

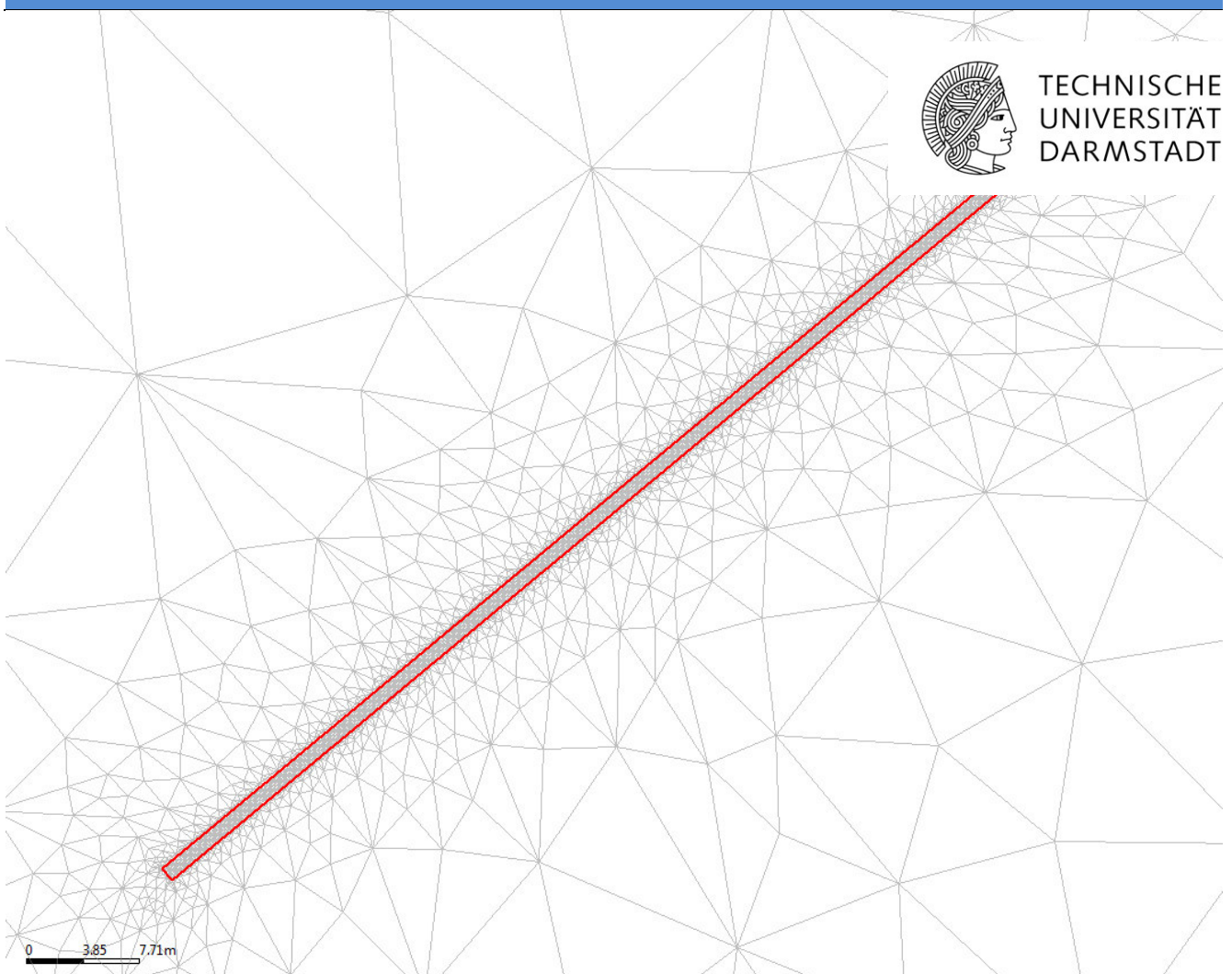
# Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen im Hessischen Ried

## Aging processes on infiltration systems in Hessian Ried

Vera Rebecca Behle  
M. Sc. Umweltingenieurwissenschaften  
Masterarbeit



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT





## Aufgabenstellung Masterarbeit

für Frau Vera Behle

Matr.-Nr. 1727421

Studiengang M.Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

### Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen im Hessischen Ried

### Aging processes on infiltration systems in Hessian Ried

#### Problemstellung:

Seit 1989 werden zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung der Metropolregion Rhein-Main im Zustrom von verbundwirksamen Gewinnungsanlagen im Hessischen Ried Anlagen zur Grundwasseranreicherung von aufbereitetem Rheinwasser durch den Wasserverband Hessisches Ried (WHR) betrieben. Zum Einsatz kommen unterschiedliche Infiltrationsorgane:

- Sickerschlitze, Gräben,
- Kiesbohrlöcher,
- Schluckbrunnen,
- Gräben.

Alterungsprozesse an Infiltrationsorganen sind ein weithin bekanntes Phänomen, welches maßgeblich von der Beschaffenheit des zu infiltrierenden Wassers abhängt. Je nach Intensität der Aufbereitung ist mit einem mehr oder weniger großen Aufwand zur Regenerierung der Infiltrationsanlagen zu rechnen.

Bei dem Grad der Aufbereitung des Rheinwassers in Biebesheim, das in die Versickerungsorgane des WHR zur Versickerung gelangt, erscheint die Gefahr der Alterung zunächst vergleichsweise gering. Dennoch wurde insbesondere bei den Kiesbohrlöchern eine Alterung

Fachbereich Bau- und  
Umweltingenieurwissenschaften

**IWAR**

Prof. Dipl. - Ing. Dr. nat. techn.  
Wilhelm Urban

Wasserversorgung und  
Grundwasserschutz

Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt

Tel. +49 6151 16 - 20805  
Fax +49 6151 16 - 20305  
w.urban@iwar.tu-darmstadt.de  
www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de

Datum  
14.03.2018

Ihre Nachricht

Unser Zeichen

Sparkasse Darmstadt  
Konto Nr. 704 300  
BLZ 508 501 50  
IBAN: DE365 085 015 000 007 043 00  
BIC: HELADEF1DAS  
Steuernr. 07 226 00139  
Ust.-ID-Nr. DE 111 608 628





durch Kolmation der oberen Filtersandschicht beobachtet. Die Art der beobachteten Kolmation als Verbackung des Korngerüsts in diesem Bereich lässt auf mikrobiologische Aktivität schließen, die ihre Grundlage in der regelmäßigen Zuführung großer Wassermengen und damit ausreichender Frachten trotz niedriger Konzentrationen hat.

#### Masterarbeit:

Verschiedene Messeinrichtungen an den Kiesbohrlöchern und an einzelnen Sickerschlitzen sowie an Grundwassermessstellen des Umfeldes ermöglichen eine eingehende Analyse der grundwasserhydraulischen Parameter des Infiltrationsbetriebes. Die Aufgabenstellung der Masterarbeit besteht darin, aus den verschiedenen grundwasserhydraulischen Parametern, die die Kolmation und ihre Auswirkung auf das Leistungsvermögen der Organe bestimmen können, anhand der vorliegenden Betriebsdaten und Beobachtungen der Randbedingungen im Umfeld der Infiltrationsanlagen diejenigen Parameter zu identifizieren, die die Sickerschlitze und Kiesbohrlöcher im Hessischen Ried und deren Neigung zur Alterung maßgeblich bestimmen. Hierzu ist eine durch numerische Modellierung unterstützte Analyse der auftretenden lokalen Fließgeschwindigkeiten im Innern der verschiedenen Organe und in ihrer Wechselwirkung zum anstehenden Untergrund (gekoppelte Strömung) vorzunehmen.

Vor dem Hintergrund der grundwasserhydraulischen Analyse ist eine Bewertung des Kenntnisstandes zu den Leistungsparametern beider Bauformen durchzuführen. Es sind Vorschläge zur gezielten Datenerfassung und zum Monitoring zu machen, die Alterungserscheinungen frühzeitig aufzeigen können.

Weiterhin sollten konstruktive Vorschläge gemacht werden, die den Regenerierungsaufwand an den Kiesbohrlöchern verringern können.





### Arbeitsschritte

- Literaturrecherche zum Themenfeld der Alterung von Infiltrationsanlagen,
- Zusammenfassung der bei Hessenwasser verfügbaren Betriebsdaten zum Sickerschlitze und zu den Kiesbohrlöchern sowie zu Grundwasserständen im Umfeld der Organe,
- Aufbau von hochaufgelösten dreidimensionalen Nahbereichsmodellen für einen Sickerschlitze und ein Kiesbohrloch,
- Kalibrierung der Modelle anhand der Betriebsdaten,
- systematische Variation der grundwasserhydraulischen Parameter und Quantifizierung des Einflusses auf die Infiltrationsleistung,
- Monitoringkonzept zum Nachweis der Alterung,
- Vorschläge für konstruktive Veränderungen an den Kiesbohrlöchern.

### Ansprechpartner:

Intern: M.Sc. Julian Mosbach

Extern: Dr.-Ing. Heiko Gerdes (BGS UMWELT, Lehrbeauftragter der TUD)  
Dr. Hermann Mikat (Hessenwasser)

### Bearbeitungszeit:

26 Wochen

Die Arbeit wird als externe Arbeit durchgeführt.

---

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban



---

Vera Rebecca Behle  
Matrikelnummer: 1727421  
Studiengang: M. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Masterarbeit  
Thema: Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen im Hessischen Ried / Aging processes on infiltration systems in Hessian Ried

Eingereicht: 05.11.2018

E-Publishing-Service der TU Darmstadt  
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>  
Jahr der Veröffentlichung der Masterarbeit auf TUPrints: 2019  
Veröffentlicht unter den vom Gesetz vorgesehenen Nutzungsrechten gemäß UrhG

Betreuung:

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban  
M. Sc. Julian Mosbach

Institut IWAR  
Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz  
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
Technische Universität Darmstadt  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt

Dr.-Ing. Heiko Gerdes  
Dipl. Ing. Martin Ergh

Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH (BGS Umwelt)  
An der Eschollmühle 28  
64297 Darmstadt

Dr. Hermann Mikat  
Dipl. Ing. David Wiesemann

Hessenwasser GmbH & Co. KG  
Taunusstraße 100  
64521 Groß-Gerau

---

---

## Abstract

To cover an increased water demand, based on various reasons and depending on local circumstances, more water is required to be pumped from groundwater sources. Regionally, it results in lowering of groundwater tables, which have negative consequences on the environment. Such examples include damages to ground settlements and drought in forests. To ensure a sufficient water supply without requiring excessive use of groundwater resources, infiltration plants for artificial groundwater replenishment occurs through the use of extraction wells. In Hessian Ried, water from the Rhine River is extracted and treated to reach drinking water quality before it is further processed through infiltration by follow on plants. This process is known as infiltration. It is observed that the infiltration performance of plants consisting of gravel drill holes is strongly influenced by colmation in the filter layer. In addition, the aging process in colmation filtering cannot be observed to the same extent on seepage trenches.

This research paper focuses on two finite element models, one for an infiltration plant consisting of gravel drill holes and one for a seepage trench. Both models are exercised in various simulations to identify and quantify groundwater hydraulic parameters relevant to infiltration performance. The model design is based on two existing infiltration plants in Hessian Ried. It is finely discretized in close range of the processing plants to reproduce the coupled internal and external flow. Apart from obvious influencing parameters such as hydraulic gradient, temperature of infiltration water has major impacts on infiltration performance. Temperature of infiltration water fluctuates between winter and summer months by 20 °C, which directly determines the density and the dynamic viscosity of the water. Due to the temperature of water during winter, infiltration performance is 35 % lower than during summer. With regard to the results of the investigation, various proposals for a constructive improvement of infiltration plants consisting of gravel drill holes are presented.

---



---

## Kurzfassung

Zur Deckung eines gestiegenen Wasserbedarfs, dessen Gründe vielfältig sein können und von örtlichen Gegebenheiten abhängen, wird vermehrt Wasser aus dem Grundwasser entnommen. Dies kann gebietsweise zu einer starken Grundwasserabsenkung führen, die wiederum Folgen für die Umwelt hat. Dies sind bspw. Setzungsschäden an Gebäuden sowie Trockenheitsschäden in Wäldern und Feuchtbiotopen. Um eine ausreichende Versorgung mit Wasser gewährleisten zu können und gleichzeitig die Grundwasserressource nicht übermäßig zu beanspruchen, werden im Zustrom zu Entnahmeverbrunnen Infiltrationsanlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung betrieben. Im Hessischen Ried wird hierfür Wasser aus dem Rhein entnommen und zu Wasser mit Trinkwasserqualität aufbereitet, bevor es über verschiedene Anlagen infiltriert wird. Beim Betrieb der Infiltration zeigt sich, dass an Anlagen bestehend aus Kiesbohrlöchern die Infiltrationsleistung mit der Zeit bedingt durch eine Kolmation in der Filterschicht stark beeinflusst wird. Dieser Alterungsprozess ist dagegen an Sickerschlitzzgräben nicht im gleichen Maß zu beobachten.

Mit der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit werden zwei Finite-Element-Modelle erstellt, eins für ein Infiltrationsorgan bestehend aus Kiesbohrlöchern und eins für einen Sickerschlitzzgraben, mit denen durch verschiedene Simulationen die für die Infiltrationsleistung maßgeblichen grundwasserhydraulischen Parameter identifiziert und quantifiziert werden. Der Modellaufbau orientiert sich hierbei an zwei bestehenden Infiltrationsanlagen im Hessischen Ried und ist im Nahbereich der Anlagen fein diskretisiert, um die gekoppelten Innen- und Außenströmungen an den Anlagen abbilden zu können. Neben augenscheinlichen einflussnehmenden Parametern wie dem hydraulischen Gradienten, zeigt die Temperatur des Infiltrationswassers große Auswirkungen auf die Infiltrationsleistung. Die Temperatur des Infiltrationswassers schwankt zwischen Winter- und Sommermonaten um 20 °C, was direkt die Dichte und die dynamische Viskosität des Wassers bestimmt. Im Winter liegt daher allein aufgrund der Temperatur des Wassers die Infiltrationsleistung um 35 % niedriger als im Sommer. Im Hinblick auf die Untersuchungsergebnisse werden verschiedene Vorschläge für eine konstruktive Verbesserung der Infiltrationsanlagen bestehend aus Kiesbohrlöchern dargestellt.

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Anlagenverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	XI
1.....Einleitung	1
2.....Grundlagen der Grundwasserhydraulik und -mikrobiologie	2
2.1     Hydraulische Grundlagen	2
2.2     Chemisch-Physikalische Grundlagen	5
2.3     Mikrobiologie des Grundwassers	6
3.....Künstliche Grundwasseranreicherung	8
3.1     Oberirdische Infiltration	9
3.1.1   Versickerungsbecken	9
3.1.2   Versickerungsgräben	10
3.1.3   Beregnung	10
3.1.4   Periodischer Überstau	10
3.2     Unterirdische Infiltration	10
3.2.1   Sickerschlitzgraben	11
3.2.2   Schluckbrunnen	11
3.2.3   Kiesbohrloch	11
3.2.4   Versickerungsleitung	12
3.3     Niederschlagswasserversickerung	12
4.....Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen	13
4.1     Alterungsprozesse und andere einflussnehmende Faktoren	13
4.1.1   Verockerung	14
4.1.2   Versinterung	15
4.1.3   Algenbildung	16
4.1.4   Feststoffe aus Rohrleitungen	16
4.1.5   Sauerstoffeintrag	16
4.1.6   Viskosität des Wassers	16
4.2     Alterung von Niederschlagswasserversickerungsanlagen	17
5.....Wasserverband Hessisches Ried	18
5.1     Hessisches Ried	18
5.1.1   Zeitliche Entwicklung	18
5.1.2   Grundwasserstände	19
5.1.3   Auswirkungen und Nutzungskonflikte	21
5.2     Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried	22
5.3     Wasserverband Hessisches Ried	23
5.3.1   Wasserwerk Biebesheim	24
5.3.2   Infiltrationsanlagen	24



6.....Ergebnisse bisheriger Untersuchungen	29
6.1    Langzeitversuche an Grundwasseranreicherungsanlagen	29
6.2    Analyse des Kolmationsvorgangs	30
7.....Modellierung der Kiesbohrlochgruppe 6 im Jägersburger Wald	33
7.1    Datenaufbereitung	35
7.2    Modellaufbau	39
7.3    Analyse der für die Kalibrierung sensitiven Parameter	48
7.3.1  Innen- und Außenströmung	49
7.3.2  Parametervariation und deren Auswirkung auf die Infiltrationsleistung	52
7.4    Kalibrierung und Validierung	54
7.4.1  Großräumige Kalibrierung	55
7.4.2  Kalibrierung im Nahbereich	57
7.4.3  Validierung	61
7.5    Identifizierung und Quantifizierung der auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden Parameter	62
7.5.1  Durchlässigkeit der Filterschicht	62
7.5.2  Fließgeschwindigkeit	64
7.5.3  Temperatur des Infiltrationswassers	66
7.5.4  Hydraulischer Gradient	69
7.5.5  Beeinflussung der Infiltrationsleistung durch andere Organe	71
7.5.6  Beeinflussung der Infiltrationsleistung durch die Kiesbohrlöcher	71
8.....Modellierung des Sickerschlitgrabens im Gernsheimer Wald	73
8.1    Datenaufbereitung	74
8.2    Modellaufbau	75
8.3    Analyse der für die Kalibrierung sensitiven Parameter	81
8.3.1  Strömungsverhältnisse	82
8.3.2  Parametervariation	84
8.4    Kalibrierung und Validierung	86
8.4.1  Großräumige Kalibrierung	86
8.4.2  Kalibrierung im Nahbereich	88
8.4.3  Validierung	89
8.5    Identifizierung und Quantifizierung der auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden Parameter	89
8.5.1  Durchlässigkeit der Filterschicht	89
8.5.2  Fließgeschwindigkeiten	91
8.5.3  Hydraulischer Gradient	92
8.5.4  Beeinflussung der Infiltrationsleistung durch andere Organen	92
9.....Monitoringkonzept	94
10....Konstruktive Veränderungen an den Kiesbohrlöchern	95
10.1    Entfernung der Filtersandschicht	95
10.2    Einbau eines Geotextils	95
10.3    Erhöhung des hydraulischen Gradienten	96
10.4    Ausbau zu einem Schluckbrunnen	96

---

10.5	Einbau von Filterrohren	97
11....	Fazit und Ausblick	99
	Literaturverzeichnis	101
	Anlage	105
	Eidesstattliche Erklärung	173



---

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage A: Übersichtspläne der Infiltrationsanlagen des Wasserverbands Hessisches Ried	106
Anlage B: Infiltrationsmenge verschiedener Organe im Hessischen Ried	109
Anlage C: Fotoaufnahmen, Lage- und Ausbaupläne der Infiltrationsorgane	114
Anlage D: Abbildungen des Modellaufbaus	127
Anlage E: Tabellen der Datenaufbereitung	142
Anlage F: Diagrammauswahl der Datenaufbereitung	151
Anlage G: Abbildungen und Tabellen der Parametervariation	155
Anlage H: Tabellen der Analyse einflussnehmender Parameter	164

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5-1: Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle 527172 bei Trebur .....	20
Abbildung 5-2: Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 im Jägersburger Wald .....	21
Abbildung 5-3: Monatliche Infiltrationsmengen der Organe 1 - 18 des Standorts Gernsheimer Wald ..	26
Abbildung 5-4: Monatliche Infiltrationsmengen der Organe 1 - 12 des Standorts Jägersburger Wald ..	27
Abbildung 7-1: Lageplan des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald .....	33
Abbildung 7-2: Infiltrationsmenge am Organ 6 im Jägersburger Wald von 1998 bis 2018 .....	34
Abbildung 7-3: Infiltrationsmengen der Kiesbohrlöcher des Organs 6 im Jägersburger Wald im Mai 2014 .....	36
Abbildung 7-4: Gemessener Überstau in den Kiesbohrlöchern des Organs 6 im Jägersburger Wald im Mai 2014.....	37
Abbildung 7-5: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch E, Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 sowie der Messstellen 11 und 17 von Januar bis Dezember 2016 .....	38
Abbildung 7-6: Temperaturverlauf des Infiltrationswassers und des angereicherten Grundwassers an der Grundwassermessstelle GS3373 im Einflussbereich des Organs 6 im Jägersburger Wald .....	38
Abbildung 7-7: Gewählter Modellrand für die Modellierung des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald .....	40
Abbildung 7-8: Erzeugte Strukturen für die Kiesbohrlöcher .....	42
Abbildung 7-9: Ausschnitt aus der Strukturdatei.....	42
Abbildung 7-10: Erzeugte Konturpunkte um den Mittelpunkt eines Kiesbohrlochs.....	43
Abbildung 7-11: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet .....	44
Abbildung 7-12: Verfeinertes Netz im Nahbereich des Organs 6 .....	44
Abbildung 7-13: Darstellung der Durchlässigkeit im Bereich des Bohrlochs A des Organs 6 .....	47
Abbildung 7-14: Simulierte Grundwassergleichen im Modellgebiet Jägersburger Wald mit Infiltrationsmengen .....	49
Abbildung 7-15: Vergleich der resultierenden Druckverteilungen bei zwei verschiedenen Szenarien...	50
Abbildung 7-16: Schlierendarstellung der Fließrichtung bei zwei verschiedenen Szenarien .....	50
Abbildung 7-17: Vergleich der resultierenden Geschwindigkeiten bei zwei verschiedenen Szenarien..	51
Abbildung 7-18: Darstellung entkoppelter Strömungsverhältnisse .....	52
Abbildung 7-19: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Jägersburger Wald (1) .....	56
Abbildung 7-20: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Jägersburger Wald (2) .....	56
Abbildung 7-21: Wärmeausbreitung bei einer Temperatur von 18 °C des Infiltrationswassers.....	60
Abbildung 7-22: Auswirkungen des Durchlässigkeitsbeiwertes der Filtersandschicht auf die Infiltrationsmenge .....	63
Abbildung 7-23: Darstellung der Fließrichtung als Schlierenbild bei einer Infiltrationsmenge von 9 m³/h (links) und 13 m³/h (rechts).....	65
Abbildung 7-24: Resultierende Abstandsgeschwindigkeiten bei einer Infiltrationsmenge von 9 m³/h (links) und 13 m³/h (rechts) .....	66
Abbildung 7-25: Auswirkungen der Temperatur des Infiltrationswassers auf die Infiltrationsmenge ...	69
Abbildung 7-26: Auswirkungen des Grundwasserstands auf die Infiltrationsmenge .....	70
Abbildung 7-27: Auswirkungen der Überstauhöhe auf die Infiltrationsmenge .....	70
Abbildung 7-28: Einfluss der Infiltration anderer Organe auf die Infiltrationsmenge des Organs 6.....	71
Abbildung 7-29: Einfluss der Infiltration an den anderen Kiesbohrlöcher auf die Infiltrationsmenge des betrachteten Kiesbohrlochs am Organ 6.....	72
Abbildung 8-1: Sickerschlitzzgraben im Gernsheimer Wald (Organ 2) .....	73
Abbildung 8-2: Infiltrationsmenge am Organ 2 im Gernsheimer Wald von 1994 bis 2018.....	74
Abbildung 8-3: Gewählter Modellrand für die Modellierung des Infiltrationsorgans 2 im Gernsheimer Wald .....	76
Abbildung 8-4: Für die Netzgenerierung relevante Strukturen .....	77
Abbildung 8-5: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet .....	78
Abbildung 8-6: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet im Nahbereich des Sickerschlitzzgrabens .....	78
Abbildung 8-7: Darstellung der Durchlässigkeit im Nahbereich des Sickerschlitzzgrabens .....	80

Abbildung 8-8: Simulierte Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald mit Infiltrations- und Fördermengen.....	81
Abbildung 8-9: Resultierende Druckverteilung bei einer Infiltrationsmenge von 100 m³/h .....	82
Abbildung 8-10: Resultierende Abstandsgeschwindigkeiten im Einlaufbereich des Sickerschlitgrabens .....	83
Abbildung 8-11: Schlierendarstellung im Einlaufbereich des Sickerschlitgrabens .....	84
Abbildung 8-12: Darstellung der gekoppelten (oben) und entkoppelten Strömungsverhältnisse (unten) .....	84
Abbildung 8-13: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald (1) .....	87
Abbildung 8-14: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald (2) .....	87
Abbildung 8-15: Auswirkungen des Durchlässigkeitsbeiwerts der Filterschichten auf die Infiltrationsmenge .....	90
Abbildung 8-16: Resultierende Abstandsgeschwindigkeiten bei einer Infiltrationsmenge von 100 m³/h .....	91
Abbildung 8-17: Auswirkungen des Grundwasserstands auf die Infiltrationsmenge .....	92
Abbildung 8-18: Einfluss der Infiltration an den anderen Organen auf die Infiltrationsmenge des Sickerschlitgrabens .....	93

#### **Anlage B:**

Abbildung B-1: Infiltrationsmenge am Organ 1 im Gernsheimer Wald von 1996 - 2018.....	109
Abbildung B-2: Infiltrationsmenge am Organ 3 im Gernsheimer Wald von 1996 – 2018.....	109
Abbildung B-3: Infiltrationsmenge am Organ 4 im Gernsheimer Wald von 1994 - 2018.....	110
Abbildung B-4: Infiltrationsmenge am Organ 5 im Gernsheimer Wald von 1996 – 2018.....	110
Abbildung B-5: Infiltrationsmenge des Kohlbruchgrabens von 1993 – 2018.....	111
Abbildung B-6: Infiltrationsmenge am Organ 5 im Jägersburger Wald von 1999 – 2018.....	111
Abbildung B-7: Infiltrationsmenge am Organ 7 im Jägersburger Wald von 1999 - 2018 .....	112
Abbildung B-8: Infiltrationsmenge am Organ 8 im Jägersburger Wald von 1999 – 2018.....	112
Abbildung B-9: Infiltrationsmenge am Organ 9 im Jägersburger Wald von 1999 - 2018 .....	113

#### **Anlage C:**

Abbildung C-1: Mess- und Regelbauwerk des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald (1) .....	114
Abbildung C-2: Mess- und Regelbauwerk des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald (2) .....	114
Abbildung C-3: Einrichtung zur Messung der Durchflussmengen der einzelnen Kiesbohrlöchern des Organs 6 .....	114
Abbildung C-4: Schachtdeckel des Kiesbohrlochs A des Organs 6.....	115
Abbildung C-5: Schachttöffnung und eingebrachte Rammfilterlanzen.....	115
Abbildung C-6: Blick in das Kiesbohrloch.....	116
Abbildung C-7: Lageplan des Infiltrationsorgans 5 im Jägersburger Wald .....	116
Abbildung C-8: Lageplan des Infiltrationsorgans 7 im Jägersburger Wald .....	117
Abbildung C-9: Lageplan des Infiltrationsorgans 8 im Jägersburger Wald .....	117
Abbildung C-10: Lageplan des Infiltrationsorgans 9 im Jägersburger Wald .....	118
Abbildung C-11: Mess- und Regelbauwerk des Sickerschlitgrabens im Gernsheimer Wald.....	120
Abbildung C-12: Sickerschlitgrabens im Gernsheimer Wald.....	120
Abbildung C-13: Blick in den Sickerschlitgrabens, Verbundsickerrohr und zwei Rammfilterlanzen (1) .....	120
Abbildung C-14: Blick in den Sickerschlitgrabens, Verbundsickerrohr und zwei Rammfilterlanzen (2) [WHR] .....	121
Abbildung C-15: Lageplan des Infiltrationsorgans 2 im Gernsheimer Wald .....	122
Abbildung C-16: Lageplan des Infiltrationsorgans 1 im Gernsheimer Wald .....	125
Abbildung C-17: Lageplan des Infiltrationsorgans 3 im Gernsheimer Wald .....	125
Abbildung C-18: Lageplan des Infiltrationsorgans 4 im Gernsheimer Wald .....	126
Abbildung C-19: Lageplan des Infiltrationsorgans 5 im Gernsheimer Wald .....	126

## Anlage D:

Abbildung D-1: Grundnetz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; gesamtes Netz.....	127
Abbildung D-2: Grundnetz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Bereich Organe 6-7 .....	127
Abbildung D-3: Grundnetz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Nahbereich Organ 6 .....	128
Abbildung D-4: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Bereich Organe 6-7 .....	128
Abbildung D-5: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Nahbereich eines Kiesbohrlochs am Organ 6.....	129
Abbildung D-6: Im Modellgebiet des Jägersburger Waldes enthaltene Grundwassermessstellen.....	129
Abbildung D-7: Grundwassermessstellen im Umkreis des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald .....	130
Abbildung D-8: Mächtigkeit des Grundwasserleiters im Modellgebiet Jägersburger Wald (Angabe in Metern) .....	130
Abbildung D-9: Mächtigkeit der oberen Tonschicht im Modellgebiet des Jägersburger Waldes (Angabe in m) .....	131
Abbildung D-10: Mächtigkeit der unteren Tonschicht im Modellgebiet des Jägersburger Waldes (Angabe in m) .....	131
Abbildung D-11: Schnitt und Darstellung der Durchlässigkeit im Bereich des Infiltrationsorgans 6 ...	132
Abbildung D-12: Darstellung der Elementschichten im Nahbereich des Bohrlochs A des Organs 6 durch die Zwangspunkte (links) und die finale Schichteinteilung (rechts) .....	132
Abbildung D-13: Grundwasserneubildung im Modellgebiet Jägersburger Wald (Angabe in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) .....	133
Abbildung D-14: Struktur des Sickerschlitgrabens inklusive der Rammfilterlanzen und einiger Grundwassermessstellen.....	134
Abbildung D-15: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; gesamtes Netz .....	134
Abbildung D-16: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Bereich Organe 2–4.....	135
Abbildung D-17: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Organ 2.....	135
Abbildung D-18: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Nahbereich Organ 2 .....	136
Abbildung D-19: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Bereich Organe 2 – 4...	136
Abbildung D-20: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Nahbereich des Sickerschlitzgrabens .....	137
Abbildung D-21: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Nahbereich eines Kiesbohrlochs am Organ 1 .....	137
Abbildung D-22: Im Modellgebiet des Gernsheimer Waldes enthaltene Grundwassermessstellen.....	138
Abbildung D-23: Mächtigkeit des Grundwasserleiters im Modellgebiet Gernsheimer Wald (Angabe in m) .....	138
Abbildung D-24: Mächtigkeit der oberen Tonschicht im Modellgebiet des Gernsheimer Waldes (Angabe in m) .....	139
Abbildung D-25: Mächtigkeit der unteren Tonschicht im Modellgebiet des Gernsheimer Waldes (Angabe in m) .....	139
Abbildung D-26: Darstellung der Elementschichten im Nahbereich des Sickerschlitgrabens durch die Zwangspunkte (links) und die finale Schichteinteilung (rechts).....	140
Abbildung D-27: Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich des Bohrlochs D des Organs 1.....	140
Abbildung D-28: Darstellung der Elementschichten im Nahbereich des Kiesbohrlochs D des Organs 1 durch die Zwangspunkte (links) und die finale Schichteinteilung (rechts) .....	141
Abbildung D-29: Grundwasserneubildung im Modellgebiet Gernsheimer Wald (Angabe in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) .....	141



---

## **Anlage F:**

Abbildung F-1: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch A sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von Mai bis Juni 2014 .....	151
Abbildung F-2: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch C sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von Mai bis Juni 2014 .....	151
Abbildung F-3: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch A sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von April bis Oktober 2015.....	152
Abbildung F-4: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch D sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von April bis Oktober 2015.....	152
Abbildung F-5: Infiltrationsmenge und Wasserstand der mittleren Rammfilterlanze im Kiesbohrloch A sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 in 2016.....	153
Abbildung F-6: Infiltrationsmenge und Wasserstand der mittleren Rammfilterlanze im Kiesbohrloch B sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 in 2017.....	153
Abbildung F-7: Darstellung der Daten des Infiltrationsversuchs am Sickerschlitzgraben im Gernsheimer Wald .....	154

## **Anlage G:**

Abbildung G-1: Grundwassergleichen im Modellgebiet Jägersburger Wald ohne Infiltrationsmengen .....	155
Abbildung G-2: Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald ohne Infiltrationsmengen .....	161

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 2-1: Einteilung der Durchlässigkeit in verschiedene Bereiche nach DIN 18130-1 .....	3
Tabelle 5-1: Auflistung der verschiedenen Infiltrationsmengen .....	25
Tabelle 7-1: Durchschnittliche Niederschlags- und Sickerwasserwerte der Jahre 1967 - 2004 .....	35
Tabelle 7-2 Durchlässigkeitsbeiwerte der Filterschichten im Kiesbohrloch .....	39
Tabelle 7-3: Zuweisung der Durchlässigkeit für das Modell im Jägersburger Wald .....	46
Tabelle 7-4: Parameterwerte des Grundzustands für die Sensitivitätsanalyse der Kiesbohrlöcher .....	53
Tabelle 7-5: Ergebnisse der Parametervariation bei gekoppelten Fließverhältnissen .....	53
Tabelle 7-6: Ergebnisse der Parametervariation bei entkoppelten Fließverhältnissen .....	54
Tabelle 7-7: Datensätze für die Kalibrierung und Validierung des Organs 6 im Jägersburger Wald .....	57
Tabelle 7-8: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer stationäre Strömungssimulation (Datensatz 08.05.2015) .....	58
Tabelle 7-9: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer stationäre Strömungssimulation (Datensatz 06.10.2015) .....	59
Tabelle 7-10: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer Wärmetransportrechnung (Datensatz 08.05.2015) .....	60
Tabelle 7-11: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer Wärmetransportrechnung (Datensatz 06.10.2015) .....	60
Tabelle 7-12: Durchlässigkeitsbeiwerte resultierend aus der Kalibrierung .....	61
Tabelle 7-13: Ergebnisse der Validierung (Datensatz 04.07.2015) .....	62
Tabelle 7-14: Ergebnisse der Validierung (Datensatz 26.08.2017) .....	62
Tabelle 7-15: Resultierende Infiltrationsmenge bei verschiedener Filterschichtabfolge .....	64
Tabelle 7-16: Resultierende Fließgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Infiltrationsmengen .....	64
Tabelle 7-17: Werte der Viskosität und der Dichte für den Temperaturbereich des Infiltrationswassers .....	67
Tabelle 7-18: Vergleich zwischen der resultierenden Infiltrationsmenge ermittelt über eine einfache Strömungsberechnung und über eine Wärmetransportrechnung .....	68
Tabelle 8-1: Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte nach Hazen .....	75
Tabelle 8-2: Zuweisung der Durchlässigkeit für das Modell im Gernsheimer Wald .....	79
Tabelle 8-3: Parameterwerte des Grundzustands für die Sensitivitätsanalyse des Sickerschlitzzgrabens .....	85
Tabelle 8-4: Ergebnisse der Parametervariation .....	85
Tabelle 8-5: Resultierende Durchlässigkeitsbeiwerte aus der Kalibrierung .....	88
Tabelle 8-6: Wasserstandsergebnisse der Kalibrierung .....	88
Tabelle 8-7: Wasserstandsergebnisse der Validierung .....	89
Tabelle 8-8: Resultierende Werte des Grundzustands .....	89
Tabelle 8-9: Einfluss auf die Infiltrationsleistung bei unterschiedlicher Filterschichtabfolge .....	90

### Anlage E:

Tabelle E-1: Übersicht der Infiltrationsorgane des Standorts Jägersburger Wald .....	142
Tabelle E-2: Zur Verfügung stehende Datensätze für das Infiltrationsorgan 6 im Jägersburger Wald .....	143
Tabelle E-3: Bestimmung der Lage der Zwangsschichten (Bezugspunkt: Bohrloch A des Organs 6) .....	144
Tabelle E-4: Bestimmung der Mächtigkeit und Anzahl der zusätzlichen Schichten (Bezugspunkt: Bohrloch A des Organs 6) .....	145
Tabelle E-5: Minimale, maximale und mittlere Infiltrationsmengen der zur Verfügung stehenden Datensätze des Organs 6 im Jägersburger Wald .....	146
Tabelle E-6: Übersicht der Infiltrationsorgane des Standorts Gernsheimer Wald .....	147
Tabelle E-7: Bestimmung der Lage der Zwangsschichten (Bezugspunkt: Knoten 5156 im SSG) .....	148
Tabelle E-8: Bestimmung der Mächtigkeit und Anzahl der zusätzlichen Schichten (Bezugspunkt: Knoten 5156 im SSG) .....	149
Tabelle E-9: Fördermengen der Entnahmefrühen im Modellgebiet Gernsheimer Wald .....	150

---

## Anlage G:

Tabelle G-1: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	155
Tabelle G-2: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	155
Tabelle G-3: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	156
Tabelle G-4: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Überstau auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	156
Tabelle G-5: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	156
Tabelle G-6: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	156
Tabelle G-7: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	157
Tabelle G-8: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	157
Tabelle G-9: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	157
Tabelle G-10: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	157
Tabelle G-11: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	158
Tabelle G-12: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	158
Tabelle G-13: Einfluss des Grundwasserstands auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	158
Tabelle G-14: Einfluss des Grundwasserstands auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	158
Tabelle G-15: Einfluss des Grundwasserstands auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	159
Tabelle G-16: Einfluss des Grundwasserstands auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	159
Tabelle G-17: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	159
Tabelle G-18: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	159
Tabelle G-19: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen .....	160
Tabelle G-20: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen .....	160
Tabelle G-21: Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald ohne Infiltrations- und Fördermengen .....	161
Tabelle G-22: Einfluss der Durchlässigkeit der oberen Filterkiesschicht auf die Infiltrationsparameter .....	162
Tabelle G-23: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf die Infiltrationsparameter .....	162
Tabelle G-24: Einfluss der Durchlässigkeit der unteren Filterkiesschicht auf die Infiltrationsparameter .....	162
Tabelle G-25: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf die Infiltrationsparameter .....	162
Tabelle G-26: Einfluss des Grundwasserstands auf die Infiltrationsparameter .....	162
Tabelle G-27: Einfluss der Infiltrationsmenge auf die Infiltrationsparameter .....	163

---

## Anlage H:

Tabelle H-1: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterschichten auf die Infiltrationsmenge .....	164
Tabelle H-2: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf die Infiltrationsmenge .....	165
Tabelle H-3: Resultierende Frachten bei unterschiedlichen Infiltrationsmengen und Eisen- sowie Mangangehalten.....	166
Tabelle H-4: Einfluss der Temperatur des Infiltrationswassers auf die Infiltrationsmenge .....	166
Tabelle H-5: Einfluss des Grundwasserstands auf die Infiltrationsmenge .....	167
Tabelle H-6: Einfluss der Überstauhöhe auf die Infiltrationsmenge .....	168
Tabelle H-7: Einfluss der Infiltration anderer Organe auf die Infiltrationsmenge.....	169
Tabelle H-8: Einfluss der Infiltration der anderen Kiesbohrlöcher auf die Infiltrationsmenge des betrachteten Kiesbohrlochs am Organ 6.....	170
Tabelle H-9: Einfluss des Grundwasserstands auf die Infiltrationsparameter .....	171
Tabelle H-10: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts der Filtersandschicht auf die Infiltrationsmenge	171
Tabelle H-11: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Filterkieses 1 auf die Infiltrationsparameter	171
Tabelle H-12: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Filterkieses 2 auf die Infiltrationsparameter	172
Tabelle H-13: Einfluss der Infiltrationsmenge der anderen Organe auf die Infiltrationsparameter.....	172

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

1KON	Attributbezeichnung für die Vorgabe einer festen Konzentration/Temperatur
AKON	Attributbezeichnung für die Anfangskonzentration/Temperatur
BILK	Attributbezeichnung für einen Bilanzknoten
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FLAE	Attributbezeichnung für die Flächenversickerung
GELA	Attributbezeichnung für die Geländeoberkante
GeWa	Gernsheimer Wald
ggf.	gegebenenfalls
GLEI	Attributbezeichnung für Knoten gleicher Potentiale
GOK	Geländeoberkante
GWBP	Grundwasserbewirtschaftungsplan
GWM	Grundwassermessstelle
HWG	Hessische Wassergesetz
JaWa	Jägersburger Wald
KBL	Kiesbohrloch
$k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
KNOT	Attributbezeichnung für einen Zu- oder Abfluss
KONZ	Attributbezeichnung für die Konzentration/Temperatur
KWER	Attributbezeichnung für die horizontale Durchlässigkeit
KWEV	Attributbezeichnung für die vertikale Durchlässigkeit
muGOK	Meter unter Geländeoberkante
müNN	Meter über Normalnull
OK	Oberkante
PORO	Attributbezeichnung für die Porosität
POTE	Attributbezeichnung für das Potential
RFL	Rammfilterlanze
S.	Seite
s.	siehe
SSG	Sickerschlitzgraben
TOC	Total Organic Carbon
vgl.	vergleiche
WBV	Wasserbeschaffungsverband
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHR	Wasserverband Hessisches Ried
z.B.	zum Beispiel
ZKOR	Attributbezeichnung für die Z-Koordinate



---

## 1 Einleitung

---

Das Hessische Ried liegt im Süden des Bundeslands Hessen und wird begrenzt durch den Main im Norden, den Rhein im Westen, die Landesgrenze zu Baden-Württemberg im Süden und den Odenwald sowie den Sprendlinger Horst im Osten. Es ist ein Teil des nördlichen Oberrheingrabens mit tertiären und quartären Ablagerungen. Aufgrund des sandig bis sandig-kiesigen Lockergesteins ist das Hessische Ried wasserwirtschaftlich als ergiebiger Porengrundwasserleiter von großer Bedeutung. Über verschiedene Maßnahmen wurde die ursprünglich unbewohnte Flussauenlandschaft, die regelmäßig überschwemmt wurde und überstaut war, in eine Kultur- und Agrarlandschaft umgewandelt. Durch Entwässerungsmaßnahmen und die aufgrund des gestiegenen Wasserbedarfs erhöhte Grundwasserförderung, sank der Grundwasserstand gebietsweise deutlich ab. Dadurch konnten weitere Siedlungsflächen erschlossen werden. Jedoch hatte dies auch negative Folgen in Form von Gebäudeschäden oder Trockenheitsschäden in den Wäldern.

Die großflächige Absenkung des Grundwassers führte zur Gründung des Wasserverbands Hessisches Ried (WHR), der sich mit der Verbesserung der Grundwasserverhältnisse befasst. Diese Verbesserung soll unter anderem durch eine künstliche Grundwasseranreicherung im Einzugsbereich der Grundwasserförderanlagen der großen Wasserwerke im Hessischen Ried erfolgen. Mit der Grundwasseranreicherung soll eine Stabilisierung des Grundwasserstands gemäß dem Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried erreicht werden. Hierzu betreibt der WHR verschiedene Infiltrationsanlagen an vier Standorten. Die Infiltrationsanlagen setzen sich aus Versickerungsbecken, Sickerschlitzgräben, Schluckbrunnen und Kiesbohrlöchern zusammen. Das Wasser, welches für die Infiltration verwendet wird, wird aus dem Rhein entnommen und zu Wasser mit nahezu Trinkwasserqualität aufbereitet.

Während des Betriebs der Infiltrationsanlagen zeigte sich jedoch, dass an den Kiesbohrlöchern vergleichsweise schnell eine Alterung des Organs stattfindet, die nicht in gleichem Ausmaß an den Sickerschlitzgräben beobachtet werden kann. Die Alterung in Form einer Kolmation des oberen Bereichs der Filterschicht führt zu einer Verminderung der Infiltrationsleistung. Durch den notwendigen Austausch dieses Bereichs der Filterschicht zur Wiederherstellung der Infiltrationsleistung steigen die jährlichen Betriebskosten. Der WHR führte verschiedene Untersuchungen durch, mit denen die Problematik der Kolmation geklärt und die einflussnehmenden Parameter identifiziert werden sollten. Die Ablagerungen, die zur Kolmation führen, können auf mineralischer und organischer Herkunft basieren und mikrobiologisch induziert sein. Trotz der geringen Konzentration an Eisen im Infiltrationswasser, die im Mittel bei etwa 0,007 mg/l liegt, konnte eine Massenzunahme an Eisen in der von der Kolmation betroffenen Schicht nachgewiesen werden. Aufgrund der deutlich voneinander abweichenden Infiltrationsfläche bei einem Sickerschlitzgraben und einem Organ bestehend aus Kiesbohrlöchern, weichen auch die Fließgeschwindigkeiten deutlich voneinander ab.

Die vorliegende Arbeit dient als Ergänzung zu den bereits durchgeführten Untersuchungen. Zunächst werden einige Grundlagen der Grundwasserhydraulik und verschiedene Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen näher erläutert. Daran schließt ein kurzer Überblick über das Hessische Ried und die vom WHR betriebenen Infiltrationsanlagen an. Durch die Erstellung von zwei hochaufgelösten dreidimensionalen Finite-Element-Modellen, eines für ein Infiltrationsorgan bestehend aus Kiesbohrlöchern und eines für einen Sickerschlitzgraben, werden die auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden grundwasserhydraulischen Parameter quantifiziert. Aufbauend auf die Ergebnisse dieser Untersuchung werden ein Monitoringkonzept zum Nachweis der Alterung sowie Vorschläge für eine konstruktive Veränderung an den Kiesbohrlöchern erarbeitet.

---

## 2 Grundlagen der Grundwasserhydraulik und -mikrobiologie

---

Die für die Fragestellung relevanten Grundlagen der Grundwasserströmung sowie für die Infiltration von Wasser in das Grundwasser werden nachfolgend kurz erläutert. Dabei ist dieses Kapitel in die Abschnitte Hydraulische Grundlagen, Chemisch-Physikalische Grundlagen und Mikrobiologie des Grundwassers gegliedert.

### 2.1 Hydraulische Grundlagen

Das Grundwasser kann im Untergrund nur fließen, sofern zusammenhängende Hohlräume im Medium vorhanden sind. Nach DIN 4049-3 lassen sich Grundwasserleiter in drei verschiedene Typen unterteilen. Wird der durchflusswirksame Hohlraumanteil durch Poren bestimmt spricht man von einem Porengrundwasserleiter. Dieser ist bei Lockergesteinen und teilweise auch bei Festgesteinen anzutreffen. Festgesteine mit Klüften und anderen Trennfugen werden als Kluftgrundwasserleiter bezeichnet. Bei verkarsteten Gesteinen liegt ein Karstgrundwasserleiter vor. Da im Hessischen Ried ein Porengrundwasserleiter vorliegt, werden die anderen beiden im Folgenden nicht weiter betrachtet. Als Poren werden die Hohlräume zwischen den einzelnen Gesteinspartikeln, wie z. B. Sandkörnern, bezeichnet, in denen sich Wasser oder Luft befindet, wobei die Gesamtheit an Poren als Porenvolumen  $V_p$  bezeichnet wird. Der Porenanteil  $n_p$  eines Mediums wird berechnet, indem das Porenvolumen  $V_p$  durch das Gesamtvolumen  $V_{ges}$  geteilt wird. (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 11ff.)

$$n_p = \frac{V_p}{V_{ges}} \quad (2.1)$$

Ein Teil des Wassers im Untergrund ist jedoch in Form von Haftwasser adhäsiv an die Körner entgegen der Schwerkraft gebunden, wodurch sich das für das Grundwasser nutzbare Porenvolumen verringert. Dieser Anteil, der für die Grundwasserströmung zur Verfügung steht, wird als effektives Porenvolumen  $V_{eff}$  bezeichnet. Der effektive Porenanteil  $n_{eff}$  wird demnach gleichermaßen berechnet wie der Gesamtporenanteil. Der effektive Porenanteil steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Durchlässigkeit des Mediums: Je größer der effektive Porenanteil ist, desto größer ist auch die Durchlässigkeit. (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 13)

$$n_{eff} = \frac{V_{eff}}{V_{ges}} \quad (2.2)$$

Der französische Ingenieur Henry Darcy prägte den Begriff der Filtergeschwindigkeit: Durchströmt ein Fluid ein poröses Medium, in seinen Versuchen war dies ein mit Sand gefülltes Rohr, so ist der Durchfluss  $Q$  direkt proportional zur durchflossenen Fläche  $A$  sowie dem Gefälle  $I$  und kann unter der Annahme einer vollkommenen Sättigung mit der folgenden Formel berechnet werden (DARCY, 1856):

$$Q = A \cdot k_f \cdot I \quad (2.3)$$

Den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  führte Darcy als Proportionalitätsfaktor ein. Die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  ergibt sich aus dem Durchfluss  $Q$  dividiert durch die durchflossene Querschnittsfläche.

$$v_f = \frac{Q}{A} \quad (2.4)$$

Wird Gleichung (2.4) in Gleichung (2.3) eingesetzt, so erhält man das Darcy-Gesetz (DARCY, 1856):

$$v_f = k_f \cdot I \quad (2.5)$$

Die Filtergeschwindigkeit ist hierbei eine fiktive Geschwindigkeit, da sie auf die gesamte durchflossene Querschnittsfläche bezogen wird, in Realität jedoch fließt das Wasser nur durch die Hohlräume, wodurch sich eine geringere Durchflussfläche ergibt und die eigentliche Fließgeschwindigkeit höher liegt. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  berücksichtigt den Widerstand des vom Wasser durchflossenen Mediums sowie die Eigenschaften des Wassers wie Dichte, Viskosität und Temperatur und hat die Einheit m/s. Die Angaben von Durchlässigkeitsbeiwerten beziehen sich dabei in der Regel immer auf Wasser, sofern dies nicht anders angegeben ist.

$$v_m = \frac{r^2}{8} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\eta} \cdot I \quad (2.6)$$

Die Permeabilität  $K$  hingegen ist ein gesteinspezifisches Maß für die Durchlässigkeit der Kornmatrix des Lockergesteins für Fluide (DIN 4049-3, 1994, S. 56). Sie gilt nur für ein bestimmtes Lockergestein und ist unabhängig von den Eigenschaften des Fluids. Bringt man das Darcy-Gesetz mit dem Hagen-Poiseuille-Gesetz (2.6) (HAGEN, 1870), welches zur Berechnung einer mittleren Geschwindigkeit  $v_m$  in einer Kapillaren verwendet werden kann, zusammen, so erhält man eine weitere Gleichung zur Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts in Abhängigkeit der Flüssigkeitseigenschaften und der Permeabilität  $K$ .

$$k_f = K \cdot \frac{\rho \cdot g}{\eta} \quad (2.7)$$

Nach DIN 18130-1 werden die Durchlässigkeitsbereiche in die in der folgenden Tabelle aufgelisteten Bereiche eingeteilt. Reiner Kies weist dabei Werte zwischen  $10^{-1} - 10^{-2}$  m/s auf, mittelkörniger Sand Werte zwischen  $10^{-3} - 10^{-4}$  m/s und die Werte für Ton liegen in der Regel unter  $10^{-9}$  m/s (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 26).

Tabelle 2-1: Einteilung der Durchlässigkeit in verschiedene Bereiche nach DIN 18130-1

$k_f$ -Wert [m/s]	Bereich
unter $10^{-8}$	sehr schwach durchlässig
$10^{-8}$ bis $10^{-6}$	Schwach durchlässig
über $10^{-6}$ bis $10^{-4}$	durchlässig
über $10^{-4}$ bis $10^{-2}$	stark durchlässig
über $10^{-2}$	sehr stark durchlässig

Mit der Formel von Allen Hazen kann der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  anhand der Körnungslinie eines Lockergesteins bestimmt werden. Zur Feststellung der Kornverteilung werden Proben von Lockergesteinen mittels einer Siebung in Bereiche mit verschiedenen Korndurchmessern getrennt. Aus diesen Siebergebnissen können anschließend Körnungslinien für das untersuchte Gestein erstellt werden. Nach Hazen ist die hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins maßgeblich vom Korndurchmesser  $d_{10}$  bei 10% des Siebdurchgangs abhängig und mit Gleichung (2.8) bestimmbar. Der empirische Beiwert in der Gleichung gilt dabei für eine Wassertemperatur von 10 °C, die in Deutschland in der Regel für oberflächennahes Grundwasser gilt. (HAZEN, 1892)

$$k_f = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \quad (2.8)$$

---

Die Gleichung zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts ist nach Hazen allerdings nur anwendbar, wenn die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  kleiner als 5 ist. Der Korndurchmesser  $d_{60}$  steht für den Korndurchmesser bei 60% des Siebdurchgangs.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.9)$$

Wie bereits erwähnt ist die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  lediglich eine theoretische Geschwindigkeit. Die wirkliche Geschwindigkeit eines Wasserteilchens wird als Bahngeschwindigkeit  $v_b$  bezeichnet, die sich auf die tatsächlich zurückgelegte Fließstrecke  $l_b$  des Wasserteilchens durch das Porenvolumen in der Zeit  $t$  bezieht. (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 28)

$$v_b = \frac{l_b}{t} \quad (2.10)$$

Diese Bahngeschwindigkeit ist allerdings nicht genau bestimmbar, da sich die tatsächliche Fließstrecke  $l_b$  des Wassers nicht eindeutig bestimmen lässt. Daher wird dieser Begriff in der neuen Fassung der DIN 4049 von 1994 nicht mehr erwähnt. Die Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  hingegen lässt sich berechnen, indem der Abstand  $l$  zwischen zwei Punkten durch die vom Wasser benötigte Zeit  $t$  für diese Strecke dividiert wird. Sie ist damit nur eine Annäherung an die tatsächliche Fließgeschwindigkeit des Wassers und aufgrund der geringeren verwendeten Fließstrecke zur Berechnung kleiner als die Bahngeschwindigkeit  $v_b$ . (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 28)

$$v_a = \frac{l}{t} \quad (2.11)$$

Die Abstandsgeschwindigkeit kann in Versuchen mittels Tracern ermittelt werden, aber auch über die Filtergeschwindigkeit kann sie bestimmt werden. Zur Berechnung der Filtergeschwindigkeit bezieht man sich auf die gesamte durchflossene Querschnittsfläche. Wird die Filtergeschwindigkeit  $v_f$  durch den durchflusswirksamen Hohlraumanteil  $n_{eff}$  geteilt, ergibt sich in guter Annäherung die Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$ . Liegt bspw. der effektive Porenanteil bei 20% ist die Abstandsgeschwindigkeit fünfmal so groß wie die Filtergeschwindigkeit. Damit gilt auch die Beziehung  $v_b > v_a > v_f$  zwischen den einzelnen Geschwindigkeiten. (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 29)

$$v_a = \frac{v_f}{n_{eff}} \quad (2.12)$$

In der Regel ist der Aufbau eines Grundwasserleiters inhomogen und anisotrop, sodass der Durchlässigkeitsbeiwert richtungsabhängig ist. Daher entspricht die vertikale Durchlässigkeit aufgrund des natürlichen Aufbaus eines Grundwasserkörpers nicht der horizontalen Durchlässigkeit, sondern ist geringer als diese. Das ist auf die Genese der Porengrundwasserleiter zurückzuführen, bei der die einzelnen Sedimentpartikel entsprechend ihrer Form sich vorwiegend horizontal ablagern und daraus eine Schichtung des Grundwasserkörpers erzeugt wird (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 30). Als Anisotropiefaktor wird der Quotient aus dem horizontalem und dem vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert definiert. Dabei bedeutet ein Faktor von 1, dass die beiden Durchlässigkeitsbeiwerte gleich groß sind und demnach ein isotroper Grundwasserleiter vorliegt. Bei kiesigen, sandigen Sedimenten liegt der Anisotropiefaktor zwischen 3 und 5 (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 30).

Die Dynamik des Grundwassers wird ausschließlich durch die Potentialdifferenz bestimmt und hängt damit entscheidend von den hydraulischen Druckverhältnissen ab. An der Oberfläche eines ungespannten Grundwassers ist der vorhandene Druck gleich dem absoluten Atmosphärendruck. Bei zunehmender Tiefe wird dazu der resultierende Druck aus dem Gewicht der überlagernden Wassersäule addiert. Der hydrostatische Druck  $p$  kann durch das Produkt aus der Höhe der Wassersäule  $h$ , der Dichte  $\rho$  des Wassers und der Erdbeschleunigung  $g$  berechnet werden. Die Zunahme des Drucks erfolgt dabei linear über die Tiefe. (HÖLTING & COLDEWEY, 2013, S. 44)

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.13)$$

## 2.2 Chemisch-Physikalische Grundlagen

Die Dichte von Wasser ist in erster Linie von der Temperatur des Wassers abhängig, wobei sich für Wasser eine Dichteanomalie zeigt: Bei einer Temperatur von etwa 4 °C weist Wasser die größte Dichte auf. Das Grundwasser strömt in Locker- und Festgesteinen in der Regel laminar durch die Hohlräume, wobei die Geschwindigkeitsverteilung im Durchflussquerschnitt parabolisch ist. An den Rändern des Durchflussquerschnitts der festen Phase des Aquifers, gilt die Haftbedingung, sodass in der flüssigen Phase die Reibung stattfindet. Der Koeffizient dieser sogenannten inneren Reibung ist die dynamische Viskosität  $\eta$  (MULL & HOLLÄNDER, 2002, S. 14ff.). Sie ist ebenso temperaturabhängig und druckabhängig wie die Dichte des Wassers. Diese Temperaturabhängigkeit kann näherungsweise mit der Gleichung (2.14) berechnet werden (HERING et al., 2007, S. 151).

$$\eta = A \cdot e^{\frac{b}{t}} \quad (2.14)$$

A sowie b sind empirisch ermittelte Konstanten und t steht für die Temperatur des Wassers. Bei einer Wärmetransportrechnung der Modellierungssoftware Spring, die zum Bearbeiten der Fragestellung verwendet wird, wird für die Berechnung der dynamischen Fluidviskosität  $\eta$  bei einer Temperatur t die folgende empirische Formel verwendet (KÖNIG et al., 2017, S. 330):

$$\eta = (239,4 \cdot 10^{-7}) \cdot 10^{\frac{248,7}{t+133,15}} \quad (2.15)$$

Bei einer Wärmetransportrechnung in Spring wird dabei zudem die Dichte des Fluids in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet. Dabei wird eine lineare Funktion als Annäherung an die Dichtefunktion des Wassers verwendet, die den bei der Simulation betrachteten Temperaturbereich abdeckt. Mit dem Wert der Dichte für die minimale und maximale Temperatur dieses Temperaturbereichs wird die Steigung  $\alpha$  der linearen Funktion berechnet, die anschließend für die Formel zur Berechnung der Dichte verwendet wird (KÖNIG et al, 2017, S. 331). Die Parameter  $t_0$  und  $\rho_0$  stehen für die entsprechenden Werte der Referenztemperatur  $t_0$ .

$$\rho(t) = \rho_0 + \alpha (t - t_0) \quad (2.16)$$

Wird in das Grundwasser Wasser infiltriert, welches eine höhere oder niedrigere Temperatur als das oberflächennahe Grundwasser hat, so findet ein Energietransport im Untergrund statt, vergleichbar mit einem Stofftransport bei einem Schadstoffeintrag. Die Größe beim Energietransport stellt hierbei die Temperatur in Form der Wärmemenge dar. Dabei sind beim Energietransport im Untergrund Wärmeleitung, Konvektion und Dispersion relevant. Die Wärmeleitung ist unabhängig von der Grundwasserbewegung und führt zu einem Wärmeausgleich. Die Transportgleichung für den Wärmestrom  $W_s$  ist vereinfacht mit Gleichung (2.17) auf der folgenden Seite gegeben.



$$w_s = \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  eines Mediums ist materialabhängig und zusätzlich bei porösen Medien stark abhängig von der Materialfeuchtigkeit (HERING et al., 2007, S. 249). Die im Wasser gespeicherte Wärmeenergie wird in Strömungsrichtung durch den Vorgang der Konvektion transportiert. Die gespeicherte Wärmemenge  $W_V$ , bezogen auf das aufgewärmte bzw. abgekühlte Volumen, ist proportional zum Temperaturunterschied  $\Delta T$  sowie zur Dichte des Mediums. Die Proportionalitätskonstante  $c_p$  wird als spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck  $p$  bezeichnet.

$$W_V = c_p \cdot \rho_w \cdot \Delta T \quad (2.18)$$

Für Wasser von 20 °C liegt die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  bei 4182 J/(kg·K) und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bei 0,6 W/(m·K) (HERING et al., 2007, S. 251). Für trockenen Quarzsand weist die spezifische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  einen Wert von 0,7 W/(m·K) und die spezifische Wärmekapazität einen Wert von 910 J/(kg·K) auf (DIN 4108-4, 2017, S. 20)(DIN EN ISO 10456, 2010, S. 18).

Die Ausbreitung von gleichen Inhaltsstoffen im bewegten Porenwasser wird als hydromechanische Dispersion bezeichnet. Dieser Vorgang wird durch die parabolische Geschwindigkeitsverteilung in der Pore, deren Größe und der Weglänge bestimmt. Zusammen mit der molekularen Diffusion wird die hydromechanische Dispersion als hydrodynamische Dispersion zusammengefasst. Als geometrisches Maß für die Durchlässigkeits- und Speicherheterogenität des Grundwassers kann die Dispersivität als charakteristische Länge in Laborversuchen oder im Feld gemessen werden. (KÖNIG et al, 2017, S. 305ff.).

## 2.3 Mikrobiologie des Grundwassers

Im Boden und auch im Grundwasser sind geogen und anthropogen bedingt Mikroorganismen vorhanden. Dabei können diese Mikroorganismen im Untergrund im Wesentlichen in zwei Gruppen aufgeteilt werden: Bakterien und Pilze. Im Grundwasser wiederum unterscheidet man autochthone, also grundwassertypische Bakterien und allochthone Bakterien, die über das Sickerwasser in das Grundwasser gelangen. Die hygienisch relevanten Bakterien, wie bspw. Krankheitserreger, zählen zu den allochthonen Bakterien, die vorwiegend aus anthropogenen Quellen stammen. Die Bakterienstämme, für die es laut Trinkwasserverordnung (TrinkwV) einen Grenzwert gibt, sind *Escherichia coli*, Enterokokken und *Pseudomonas aeruginosa* (TrinkwV, 2001, S. 26). Dabei wird ein Nachweis von *E. coli* im Wasser als sicherer Hinweis für eine fäkale Verunreinigung eingestuft. Hinzu kommen *Clostridium perfringens* und coliforme Bakterien, die in der TrinkwV als Indikatorparameter für eine fäkale Verunreinigung geführt werden. Jedoch ist Grundwasser im Vergleich mit Oberflächenwasser eher selten von anthropogenem Bakterieneintrag betroffen, da ein humusreicher Boden als Barriere dient. Zusätzlich wird zur Absicherung um Entnahmehäuser für die Trinkwasserversorgung Wasserschutzszonen festgelegt, wobei die engere Schutzzone (Zone II) einen Schutz vor bakteriellen Verunreinigungen gewähren soll (DVGW Arbeitsblatt W-101, 2006, S. 7).

Im Untergrund sind verschiedene Bakterien auch an Prozessen beteiligt, die meist den Abbau von organischen sowie anorganischen Verbindungen bedingen. Dadurch sorgen diese Bakterien unter anderem für eine Veränderung der Wasserbeschaffenheit. Zu diesen Abbauprozessen zählen bspw. die mikrobielle Reduktion von Sulfat oder Nitrat, wobei man sich vor allem die Nitrifikation und Denitrifikation durch Bakterien in Abwasserreinigungsanlagen zunutze macht. Ein weiterer wichtiger Abbauprozess durch Mikroorganismen ist die Oxidation und Reduktion von Eisen. Sind aerobe Bedingungen im Grundwasserkörper gegeben liegt das Eisen als nahezu wasserunlösliche Eisen(III)-Verbindung vor. Sofern ebenso organische Substanzen vorhanden sind, die von den Bakterien als Energie- und Nahrungsquelle genutzt werden, wird das dreiwertige Eisen zur wasserlöslichen

---

zweiwertigen Form reduziert. Ebenso gibt es Bakterien, die diese Reaktion umkehren und Eisen(II) zu Eisen(III) oxidieren. Da hierfür Sauerstoff benötigt wird, müssen für die Oxidation von Eisen(II) aerobe Bedingungen vorliegen. Die folgende Formel (2.19) stellt die entsprechende Reaktionsgleichung dar.



Durch manganoxidierende Bakterien kann gleichermaßen wasserlösliches zweiwertiges Mangan zu vierwertigem Mangan oxidiert werden. Beide Formen, Eisen(III) und Mangan(IV), werden dabei als schwerlösliche Oxidhydrate abgeschieden (FRITSCH et al., 2014, S. 343). Den Prozess der Eisen- und Manganoxidation durch Bakterien macht man sich bei der Trinkwasseraufbereitung zunutze. Die im Wasser enthaltenen sessilen Eisen- und Manganbakterien bilden an der Oberfläche des Filtermaterials einen Biofilm und oxidieren das enthaltene Eisen(II) und Mangan(II). Die dabei entstehenden Oxidhydrate setzen sich anschließend im Filter ab. Eine weitere Form der Nutzung dieses natürlichen Prozesses stellt die unterirdische Enteisung und Entmanganung dar.

---

### 3 Künstliche Grundwasseranreicherung

---

Unter Grundwasseranreicherung wird nach DIN 4046, in der unter anderem Begriffe der Wasserversorgung definiert sind, eine Vermehrung des Wasserdargebots verstanden bei gleichzeitiger natürlicher Aufbereitung des Wassers. Diese natürliche Aufbereitung wird unter anderem durch die Untergrundpassage hervorgerufen. Durch den gestiegenen Wasserbedarf in der Vergangenheit wurde teilweise in einigen Gebieten übermäßig Grundwasser entnommen, um diesen neuen Bedarf abdecken zu können. Dadurch sank der Grundwasserspiegel und es kam gebietsweise zur Trockenlegung ehemaliger Feuchtbiotope und zu Waldschäden. Um weitere negative Einflüsse auf die Natur zu vermeiden und gleichzeitig weiterhin die Wasserversorgung gewährleisten zu können, wurde eine Grundwasseranreicherung notwendig, wobei die Grundwasserneubildung künstlich erhöht wird. Die genauen Hintergründe der Grundwasseranreicherung im Hessischen Ried werden in Kapitel 5 erläutert.

Nach dem DVGW-Arbeitsblatt W126, welches sich mit der Planung, dem Bau und dem Betrieb von Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung für die Trinkwassergewinnung befasst, sind die Ziele dieser Anreicherung „die Erhöhung der [...] gewinnbaren Wassermenge“ sowie eine „qualitative Verbesserung des [...] Anreicherungswassers“ (DVGW-Arbeitsblatt W126, 2007, S. 6). Dabei wird vorwiegend Wasser aus Flüssen und Seen entnommen und versickert, wobei es je nach gewählter Versickerungsmethode und Rohwasserbeschaffenheit vor der Versickerung aufbereitet werden muss. Das anschließend in der Fassungsanlage entnommene Wasser stellt ein Mischwasser aus natürlichem Grundwasser, Anreicherungswasser und ggf. Uferfiltrat dar. Die Grundwasseranreicherung für die öffentliche Trinkwasserversorgung wirkt sich dabei qualitativ nur wenig auf das umgebende Grundwasser aus, da es als System direkt mit der Entnahme in Verbindung steht (DVGW-Arbeitsblatt W126, 2007, S. 6).

Durch das Durchströmen der Sand- und Kiesfilter sowie der Sedimente des Grundwasserleiters wird das Anreicherungswasser gereinigt. Unter anderem werden dabei partikuläre Wasserinhaltsstoffe abgeschieden, Mikroorganismen zurückgehalten oder eliminiert und das Wasser durch chemisch-physikalische Reaktionen qualitativ verändert. Vor allem im oberen Bereich des Infiltrationsweges erfolgt ein biologischer Abbau organischer Inhaltsstoffe. Ebenso findet ein Ausgleich der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen des Oberflächenwassers nach der Infiltration im Grundwasserleiter statt. (DVGW-Arbeitsblatt W126, 2007, S. 7)

Nach dem DVGW-Arbeitsblatt W126 gliedert sich die künstliche Grundwasseranreicherung für die Trinkwassergewinnung in fünf Abschnitte, welche entsprechend der jeweiligen Zielsetzung in unterschiedlicher Form umgesetzt werden. Dazu gehört als erster Schritt die Aufbereitung des Rohwassers, welche abhängig von der Beschaffenheit des Wassers und des gewählten Infiltrationsverfahrens erforderlich sein kann. Anschließend folgt die Infiltration des Anreicherungswassers, wobei sicherzustellen ist, dass durch die Anreicherung keine negativen qualitativen und quantitativen Beeinträchtigungen des Grundwassers hervorgerufen werden. Durch weite Fließwege und der daraus resultierenden Verweildauer im Grundwasserleiter wird durch die Untergrundpassage ein Ausgleich der Beschaffenheitsschwankungen und die Elimination unerwünschter Mikroorganismen ermöglicht. Das angereicherte Grundwasser wird gefasst und entnommen und während des letzten Schrittes der künstlichen Grundwasseranreicherung für die Trinkwassergewinnung je nach Beschaffenheit entsprechend aufbereitet. (DVGW-Arbeitsblatt W126, 2007, S. 7)

Bedingung für eine funktionierende Grundwasseranreicherung ist das Vorhandensein geeigneter hydrogeologischer Untergrundverhältnisse, welche durch eine Erkundung und ggf. zusätzlich durch eine Modellierung untersucht werden sollen. Dabei erleichtern oberflächennahe und gut durchlässige Grundwasserleiter, die nur eine geringe Überdeckung aufweisen, den Bau von Infiltrationsanlagen, wie bspw. Versickerungsbecken oder -wiesen. Jedoch sind gering durchlässige Schichten oberhalb des



---

Grundwasserleiters auch vorteilhaft, da diese das Grundwasser vor einem Schadstoffeintrag über die Oberfläche absichern. Maßgebend für die Versickerungsleistung ist dabei die Durchlässigkeit in der ungesättigten und gesättigten Zone unterhalb der Infiltrationsanlagen. (DVGW-Arbeitsblatt W126, 2007, S. 9)

Die Beschaffenheit der Sedimente im Grundwasserleiter sowie die des natürlichen Grundwassers selbst müssen den qualitativen Zielvorstellungen der künstlichen Grundwasseranreicherung entsprechen. Dabei sollte das angereicherte Grundwasser nicht mit sich negativ auf die Qualität auswirkenden Wasserinhaltsstoffen belastet werden, was eine Folge von Auswaschungen aus den Sedimenten oder der Mischung mit dem natürlichen Grundwasser sein kann. Eisen und Mangan können sich bspw. unter sauerstoffarmen Bedingungen aus im Sediment vorhandenen Ablagerungen lösen und später wieder als Feststoff ausfallen, was unter anderem zu Verockerungen in Brunnen führen kann. (DVGW-Arbeitsblatt W126, 2007, S. 9f.)

Das Rohwasser zur Infiltration sollte in ausreichender Beschaffenheit sowie Menge zur Verfügung stehen und gleichzeitig dürfen durch die Rohwasserentnahme sowie durch die Infiltration die betroffenen Systeme, wie zum Beispiel Oberflächengewässer und das Grundwassersystem, keinen negativen ökologischen Schaden erleiden. Der Temperatúrausgleich im Untergrund erfolgt nur langsam und benötigt daher eine entsprechend lange Untergrundpassage. Bei niedrigen Temperaturen ist die Viskosität höher, was zu einer Verminderung der Infiltrationsleistung führt. Liegt die Temperatur bei 5 °C finden mikrobiologische Abbauprozesse nur verlangsamt statt. Wassertemperaturen höher als 10 °C hingegen fördern Abbauprozesse organischer Stoffe während der Untergrundpassage. Im Rohwasser enthaltene Sink- und Schwebstoffe reduzieren die Infiltrationsleistungen, da sie sich in der Filterschicht absetzen und diese damit blockieren. Bei Hochwasserführung eines Flusses sind diese Stoffe vermehrt im Wasser zu finden, sodass dies bei der Planung und Umsetzung einer künstlichen Grundwasseranreicherung berücksichtigt werden muss. Durch Flockung oder Sedimentation können die enthaltenen Sink- und Schwebstoffe aus dem Rohwasser entfernt werden. Ist ein solcher Aufbereitungsschritt nicht vorhanden, muss möglichst früh vor Eintritt des Hochwasserereignisses die Rohwasserentnahme zur Infiltration unterbunden werden. (DVGW-Arbeitsblatt W126, 2007, S. 10)

In den anschließenden Abschnitten folgt eine kurze Beschreibung der für die künstliche Grundwasseranreicherung verwendeten Anlagen, die sich in oberirdische und unterirdische Anlagen unterscheiden lassen. Daran anknüpfend wird ein kurzer Einblick in die Versickerung von Niederschlagswasser gegeben.

### **3.1 Oberirdische Infiltration**

Die oberirdische Infiltration wird in Gebieten eingesetzt, in denen der Grundwasserleiter vergleichsweise nah an die Geländeoberkante heranreicht und in denen eine große Fläche zur Verfügung steht. Ihr Vorteil ist die große Infiltrationsfläche, die gute Durchlässigkeit und die relativ leichte Regenerierbarkeit der Anlagen. Aufgrund der Bodenpassage und der dadurch genutzten Reinigungsleistung des Bodens sind die Anforderungen an die Beschaffenheit des Rohwassers bei der oberirdischen Infiltration deutlich geringer als bei der unterirdischen Infiltration. Es gibt verschiedene Arten der oberirdischen Infiltration, von denen folgend die wichtigsten kurz erläutert werden.

#### **3.1.1 Versickerungsbecken**

Die Infiltration von Wasser über Versickerungsbecken stellt die gängigste Methode der künstlichen Grundwasseranreicherung dar, dabei haben die Becken meist eine Fläche von mehreren 100 m<sup>2</sup> bis hin zu 10.000 m<sup>2</sup>. Liegt eine Lehmschicht oberhalb des Grundwasserleiters sollte diese beim Bau des Beckens abgetragen werden, um eine ungehinderte Infiltration zu ermöglichen. Der auf die Beckensohle aufgebrachte Sand dient als Infiltrationsfläche und gleichzeitig als Filter zur Reinigung

---

des Wassers. Wie bei Deichen können die Böschungen der Versickerungsbecken begrünt oder auch mit Platten oder Ort beton befestigt werden. In Abhängigkeit vom Infiltrationsbetrieb und der Infiltrationsmenge ist der Sandfilter nach einer gewissen Zeit zu reinigen, um die dadurch verringerte Infiltrationsleistung wieder zu erhöhen. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 166ff.) Nachteil der Versickerungsbecken ist die vermehrte Algenbildung durch den flächenhaften Lichteintrag, wodurch es zu einer Verdichtung der Filteroberfläche und damit ebenfalls zu einer Verringerung der Infiltrationsleistung kommen kann (Wasserverband Hessisches Ried, 2005, S. 16).

### **3.1.2 Versickerungsgräben**

Auch Gräben können zur Versickerung von Wasser und damit zur künstlichen Anreicherung des Grundwassers genutzt werden. Ein Teil des Wassers, welches in den Gräben geführt wird, versickert dabei generell in den Untergrund. Diese Infiltration kann durch gezielte Maßnahmen wie Aufstau und Sohlenpflege verstärkt werden. Oftmals werden auch ehemalige Entwässerungsgräben als Versickerungsgräben verwendet. Die Infiltrationsrate ist dabei vergleichsweise hoch, sofern die Gräben bis in den gut durchlässigen Grundwasserleiter hineinreichen, jedoch sollte bei einem grobporigen Grundwasserleiter eine zusätzliche Filtersandschicht eingebracht werden, um das Grundwasser vor einem Schadstoffeintrag zu schützen. Zur Aufrechterhaltung der Infiltrationsleistung müssen die Gräben regelmäßig gereinigt und entkrautet werden. Durch eine Baumbepflanzung am Grabenrand kann im Gegensatz zu den Versickerungsbecken das Algenwachstum verringert werden. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 163)

### **3.1.3 Beregnung**

Die Methode der Beregnung bewachsener Bodenflächen wird oft in der Landwirtschaft zur Bewässerung angewendet, wobei die künstliche Grundwasseranreicherung durch die Versickerung des nicht verdunsteten überschüssigen Wassers erfolgt. Aber auch als gezielte Maßnahme kann die Beregnung in Gebieten eingesetzt werden, die gut durchlässige Deckschichten aufweisen und in denen die Verdunstungsverluste eine untergeordnete Rolle spielen. Die mittlere Anreicherungsleistung dieser Infiltrationsmethode ist mit  $0,2 - 1,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  anzusetzen. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 161)

### **3.1.4 Periodischer Überstau**

Beim periodischen Überstau von Wiesen wird das Wasser in festgelegten zeitlichen Abständen über landwirtschaftlich genutzte Flächen geleitet. Dabei versickert das Anreicherungswasser über die intakte Humusschicht, die dabei als Filter fungiert. Jedoch ist der Flächenbedarf relativ groß, da der Überstau nur alternierend erfolgen kann, um eine Regeneration der Bodenschichten mittels Durchlüftung gewährleisten zu können. Die überfluteten Flächen können weiterhin landwirtschaftlich genutzt werden, bspw. zur Heugewinnung. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 162)

Auch Waldflächen können temporär eingestaut werden und somit zur künstlichen Grundwasseranreicherung beitragen, wobei dieser Einstau auch über vergleichsweise lange Zeiträume erfolgen kann. Auch hierbei darf zur Regeneration des Bodens der Einstau nur zeitweise erfolgen, um die Filterwirkung der Humusschicht aufrecht zu erhalten. Die mittlere Infiltrationsleistung liegt mit  $1 - 2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  hierbei etwas höher als beim Überstau von Wiesen. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 163)

## **3.2 Unterirdische Infiltration**

Der Bau und Betrieb von Anlagen zur oberirdischen Infiltration wird dann unwirtschaftlich, wenn die wasserundurchlässigen Deckschichten im Untergrund eine zu große Mächtigkeit aufweisen. Ebenso ist eine Umsetzung wegen des großen Flächenbedarfs und des vergleichsweise großen Eingriffs in die

---

Umwelt stellenweise unerwünscht bzw. nicht realisierbar. In diesen Fällen kann zur künstlichen Grundwasseranreicherung auf Anlagen der unterirdischen Infiltration zurückgegriffen werden. Da eine Barriere in Form einer Humusschicht hierbei fehlt, bestehen höhere Anforderungen an das Infiltrationswasser zum Schutz des Grundwassers. Zusätzlich besteht für diese Form der Anlagen nur eine geringe Möglichkeit der Regenerierung, sodass das zu infiltrierende Wasser weitgehend aufbereitet werden muss. Unter anderem sind Schwebstoffe aus dem Wasser zu entfernen, da diese die Eintrittspfade in den Untergrund abdichten. Diese Pfade können ebenso durch Freiwerden von im Wasser gelösten Gasen verstopft werden und somit die Infiltrationsleistung verringern. Vorteile der unterirdischen Grundwasseranreicherung sind unter anderem das Unterbinden eines Schadstoffeintrags durch Niederschläge, die Verhinderung von Algenwachstum durch den fehlenden Lichteintrag und eine höhere Sicherheit gegenüber Eingriffen Unbefugter. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S 186f.)

Wie bei der oberirdischen gibt es auch bei der unterirdischen Infiltration verschiedene Formen der Umsetzung, wobei diese nochmals in vertikale und horizontale Bauweisen aufgeteilt werden. Anschließend werden die wichtigsten Arten der unterirdischen Infiltrationsanlagen kurz erläutert.

### **3.2.1 Sickerschlitgrab**

Wolters und Hantke entwickelten Anfang der 1980er Jahre den Sickerschlitgrab mit der Überlegung, dass zur Versickerung ein Becken möglichst tief und schmal gestaltet werden müsse (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 194). Ein solcher Graben weist in der Regel eine Breite von einem Meter auf und wird bis zu einer Tiefe von 6 m ausgehoben und mit einer Sand- oder Kiesschüttung verfüllt, die Länge des Grabens ist variabel. Die Infiltration erfolgt demnach nicht nur über die Sohle, sondern auch seitlich, wodurch eine im Vergleich zum Flächenbedarf große Infiltrationsfläche erzeugt wird. Aufgrund der geringen Breite kann der Graben mit Platten oder ähnlichem abgedeckt werden, wodurch eine Algenbildung und Flugsandeintrag unterbunden wird. Jedoch wird abhängig von der Länge des Grabens eine vergleichsweise große zusammenhängende Fläche zur Umsetzung benötigt.

### **3.2.2 Schluckbrunnen**

Schluckbrunnen, auch Versickerungsbrunnen oder Negativbrunnen genannt, ähneln in ihrer Grundkonstruktion vertikalen Förderbrunnen. In das Brunnenrohr wird das zu infiltrierende Wasser eingebracht, welches über das Filterrohr in den Grundwasserleiter gelangt. Die Infiltrationsleistung hängt von der Betriebsweise und der Regenerierungsmöglichkeit des Brunnens ab. Die Leistungsfähigkeit kann dabei unter anderem durch Verockerung, biologische Verschleimung oder Versinterung im Verlauf des Betriebs stark verringert werden. Zur Regenerierung sind ein Abpumpen des Brunnens sowie die Behandlung mit Chlor und anschließendem Klarpumpen hilfreich. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 188ff.)

### **3.2.3 Kiesbohrloch**

Mit Kiesbohrloch wird eine großkalibrige Bohrung bezeichnet, die mehr oder weniger tief in den Grundwasserleiter hineinreicht und mit Sand oder Kies verfüllt wird. Die Zufuhr des zu infiltrierenden Wassers erfolgt dabei von oben. Aus der Mantelfläche und der Sohle des Kiesbohrlochs ergibt sich die resultierende Infiltrationsfläche. Durch den geringen Platzbedarf können die Bohrlöcher flexibel im Gelände angeordnet werden, wodurch ein geringerer Eingriff in die Umwelt als bei einem Sickerschlitgrab notwendig ist. In Summe kann mit einigen Kiesbohrlöchern die Infiltrationsleistung eines Sickerschlitgrabens erreicht werden. Die Endteufe und der Durchmesser des Bohrlochs hängen dabei von der erwünschten Infiltrationsleistung ab.

---

Wie bei den Schluckbrunnen kann die Infiltrationsleistung während des Betriebs durch Verockerung, Versinterung oder biologische Verschleimung stark abnehmen. Durch den für ein Kiesbohrloch spezifischen Ausbau ist jedoch ein Regenerierungspumpen oder die Anwendung chemischer Verfahren und anschließendes Klarpumpen nicht möglich.

### **3.2.4 Versickerungsleitung**

Versickerungsleitungen, die auch Sickerrohrleitungen genannt werden, werden in größerer Tiefe unterhalb einer undurchlässigen Schicht verlegt. Dabei werden Sickerleitungen aus gelochten oder geschlitzten Rohren verwendet, die mit einer Sand- oder Kiespackung umhüllt werden. Das zu infiltrierende Wasser wird in die Leitungen geleitet, wo es über die Öffnungen in den Rohren in den Untergrund versickert. Da die Sickerrohrleitungen in großer Tiefe verbaut werden, ist eine Regenerierung nur begrenzt möglich.

## **3.3 Niederschlagswasserversickerung**

Lange Zeit wurde das in Siedlungsgebieten anfallende Niederschlagswasser vollständig über die Kanalsysteme in die Abwasserbehandlungsanlagen geleitet. Durch den vermehrten Siedlungsbau wurden immer mehr Flächen befestigt und versiegelt, sodass immer mehr Niederschlagswasser zur Beseitigung vor Ort anfällt und dadurch aus dem Wasserkreislauf genommen wird. Durch ein Umdenken rückte der Boden- und Gewässerschutz wieder in den Fokus und es wurde vermehrt Wert auf eine Entsiegelung und die dezentrale Versickerung des Niederschlags in den Untergrund gelegt, mit dem Ziel einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. Mittlerweile ist in manchen neu erschlossenen Gebieten die Einleitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation untersagt und muss vor Ort über Versickerungsanlagen in den Untergrund eingebracht werden.

Mit dem Arbeitsblatt DWA-A138 „Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser“ der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) wird Planern, Bauherren und Behörden ein Überblick über die zurzeit bekannten Maßnahmen und Versickerungsmöglichkeiten von Niederschlagswasser gegeben. Die Anlagen zur Versickerung können dabei wie bei der künstlichen Grundwasseranreicherung in oberirdische und unterirdische Versickerungsanlagen unterteilt werden. Die Größe der Anlage bemisst sich dabei unter anderem nach der angeschlossenen versiegelten Fläche, der Durchlässigkeit des Bodens und der maßgebenden Regenspende. Zu den oberirdischen Anlagen zählen die Flächenversickerung, Versickerungsbecken und die Muldenversickerung, bei denen ein dauerhafter Einstau mit der Gefahr der Verschlickung und Verdichtung der Oberfläche vermieden werden soll (DWA Arbeitsblatt DWA-A 138, 2005, S. 24f.). Die Versickerungsfläche besteht dabei in der Regel aus bewachsenem Boden, wobei diese Bodenpassage für eine gewisse Reinigung des Wassers sorgt und dadurch auch leicht verschmutztes Niederschlagswasser versickert werden kann.

Sofern die zur Verfügung stehenden Flächen nicht ausreichend sind, kommen unterirdische Versickerungsanlagen zum Einsatz, wie zum Beispiel der Versickerungsschacht und die Rigolenversickerung sowie auch Kombinationen aus ober- und unterirdischen Anlagen wie Mulden-Rigolen-Elementen. Hierbei gilt für das Niederschlagswasser aufgrund der fehlenden Passage durch einen Humusboden eine striktere Anforderung an die Beschaffenheit des Niederschlagswassers zum Schutz des Grundwassers. Der Versickerungsschacht ähnelt dabei den Kiesbohrlöchern der künstlichen Grundwasseranreicherung, auch wenn diese bei der Niederschlagswasserversickerung nur wenige Meter in das Anstehende hineinreichen. Zum Schutz des Grundwassers darf dabei die Oberkante der Filterschicht der zur Niederschlagsversickerung verwendeten Schächte mindestens einen Abstand von 1,5 m zum mittleren höchsten Grundwasserstand nicht unterschreiten (DWA Arbeitsblatt DWA-A 138, 2005, S. 27), während bei Kiesbohrlöchern zur künstlichen Grundwasseranreicherung je nach Beschaffenheit des Infiltrationswassers eine Durchströmung der Anlage durch das Grundwasser möglich ist.



---

## 4 Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen

---

Unter Alterungsprozessen werden Materialschwächung, Betriebsstörungen sowie die Abnahme der Infiltrationsleistung der Anlage verstanden. Dabei sind bspw. Verunreinigungen und Verockerung keine neuen Probleme, sondern bereits seit mehreren Jahrhunderten bei Brunnen bekannt und beschrieben. Ist die Alterung der Anlage soweit fortgeschritten, dass nur noch ein eingeschränkter Betrieb möglich ist oder die Infiltrationsleistung zu stark gesunken ist, ist eine Regenerierung der Anlage notwendig. Die Möglichkeiten einer Regenerierung richten sich dabei nach der vorhandenen Infiltrationsanlage und Art der Alterung.

An Infiltrationsorganen treten annähernd die gleichen Alterungserscheinungen auf wie an Förderbrunnen, da diese Prozesse maßgebend von der Wasserbeschaffenheit sowie den Untergrundverhältnissen abhängig sind. Aufgrund der Abhängigkeit von verschiedenen Parametern kann der zeitliche Ablauf einer Alterung nicht vorherbestimmt werden. Im DVGW-Arbeitsblatt W130 werden die verschiedenen Alterungsprozesse von Entnahmehäupten anhand ihrer Ursachen in Versandung, Verockerung, Korrosion, Versinterung, Verschleimung und Aluminiumausfällung unterschieden. Diese verschiedenen Prozesse sind zwar nicht aneinander gekoppelt, können aber durchaus in Kombination auftreten. Dies gilt dabei auch für Infiltrationsanlagen. Eine Versandung im eigentlichen Sinne ist bei Infiltrationsanlagen in der Regel jedoch nicht zu erwarten aufgrund der umgekehrten Fließrichtung des Wassers. Jedoch kann bei unsachgemäßem Ausbau von unterirdischen Anlagen oder auch durch falsche Wahl der Filtermaterialien die in diesem Material enthaltenen Anteile an Unterkorn in tiefere Schichten verfrachtet werden. Eine Korrosion der bei den Infiltrationsanlagen verwendeten Materialien ist zwar möglich, spielt aber eine untergeordnete Rolle und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet. Ebenso wird die Aluminiumausfällung aufgrund ihres seltenen Auftretens und geringen Bedeutung für die Alterung von Infiltrationsanlagen nicht näher erläutert.

In den anschließenden Abschnitten werden die für die Alterung von Infiltrationsanlagen wichtigsten Prozesse und deren Ursachen beschrieben. Anschließend wird zusätzlich kurz auf Alterungsprozesse bei der Niederschlagswasserversickerung eingegangen.

### 4.1 Alterungsprozesse und andere einflussnehmende Faktoren

Die möglichen Alterungsprozesse sind von der Art der Anlage zur künstlichen Grundwasseranreicherung abhängig. Dabei treten manche Prozesse vorwiegend bei oberirdischen Anlagen auf, wie bspw. eine Algenbildung, und andere nur bei unterirdischen Anlagen. Bei der unterirdischen Infiltration vermischt sich das Infiltrationswasser in der Regel direkt in der Anlage mit dem Grundwasser. Da die Wässer eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung aufweisen, stellt sich über diverse Reaktionen ein neues chemisches Gleichgewicht ein. Als Produkte dieser Reaktionen können schwer lösliche Feststoffe entstehen, die sich in der Infiltrationsanlage ansammeln und dadurch eine Alterung hervorrufen.

Andere Prozesse und Randbedingungen, die die Infiltrationsleistung beeinflussen können, werden unter Umständen fälschlicher Weise als Alterung des Infiltrationsorgans wahrgenommen, weil deren Zusammenhänge und deren Einfluss ggf. nicht ausreichend quantifiziert oder bekannt sind. Dazu zählt bspw. die Temperatur des Infiltrationswassers, die direkt die dynamische Viskosität beeinflusst. Aufgrund der höheren Viskosität ist in der Regel bei kaltem Wasser eine geringere Infiltrationsleistung zu erwarten als bei warmen Wasser. In den folgenden Abschnitten wird näher auf die für die Alterungserscheinungen an Infiltrationsorganen maßgeblichen Prozesse sowie auf weitere einflussnehmende Faktoren eingegangen.

#### 4.1.1 Verockerung

Unter Verockerung wird die Ausfällung von Eisen- und Manganverbindungen verstanden, welche in die zwei Arten chemische und biologische Verockerung unterteilt wird. Sie ist die häufigste Form der Brunnenalterung und tritt ebenso auch bei Infiltrationsorganen auf. Dabei kommt der biologischen Verockerung eine deutlich größere Rolle zu als der chemischen Verockerung. Bei den Ausfällungsprodukten handelt es sich um unterschiedliche Oxide, Hydroxide und Oxihydroxide, jedoch wird im Folgenden zur Vereinfachung von Eisen- bzw. Manganoxiden die Rede sein. Mit dem Infiltrationswasser gelangt auch gelöster Sauerstoff in das Grundwasser. Mit Gleichung (4.1) ist die chemische Reaktionsgleichung zur Oxidation von Eisen gegeben. Kommt das im Wasser gelöste zweiwertige Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) mit gelöstem Sauerstoff in Kontakt, wird es zu dreiwertigem Eisen oxidiert. Das entstehende Eisenoxid fällt dabei wegen seiner geringen Löslichkeit aus. (HOUBEN & TRESKATIS, 2003, S. 84f.)



Die Reaktionsgleichung der Oxidation von im Wasser gelöstem Mangan ähnelt der des Eisens, da sich Mangan analog verhält. Bei Kontakt mit gelöstem Sauerstoff reagiert zweiwertiges Mangan zu unlöslichem Manganoxid. Der Unterschied im Vergleich mit der Oxidation von Eisen ist, dass nicht nur dreiwertiges, sondern auch vierwertiges Mangan bei der Reaktion entstehen kann (vgl. Gleichung (4.2) und (4.3)).



Die im Boden und somit auch im Grundwasserleiter lebenden Mikroorganismen sind überwiegend sessil, das heißt, dass sie unbeweglich im Untergrund verharren. Dadurch sind sie von den im Wasser transportierten Nährstoffen abhängig, wobei in Brunnennähe optimale Bedingungen für sie herrschen, da dort vergleichsweise große Wassermengen vorbeiströmen und somit ein großes Dargebot an Nährstoffen vorhanden ist. Dies gilt auch für Infiltrationsanlagen, bei denen durch eine hohe Infiltrationsmenge auch bei geringen Stoffkonzentrationen eine für die Mikroorganismen ausreichende Fracht resultiert. Wie für Menschen ist auch für Mikroorganismen Eisen ein essentieller Spurenstoff. Jedoch gibt es Bakterien, die eine spezielle Affinität zu Eisen bzw. Mangan zeigen. Da in der Regel im Grundwasser mehr oder weniger neutrale Bedingungen herrschen (pH-Wert sechs bis acht) treten dort neutrophile Eisen- und Manganbakterien auf. Schon seit längerem ist ihr bedeutender Einfluss bei der Bildung von Inkrustationen in der Wasserwirtschaft bekannt, wobei die biologische Verockerung vorwiegend in den Bereichen mit den höchsten Strömungsgeschwindigkeiten beginnt. (HOUBEN & TRESKATIS, 2003, S. 91)( Verein zur Förderung des Instituts WAR, 1997, S. 35f.)

Die am häufigsten anzutreffenden Gattungen sind *Gallionella* (insbesondere *G. ferruginea*) und *Leptothrix* (insbesondere *L. ochracea* und *discophorus*). Für *Gallionella* konnte eine autotrophe Lebensweise nachgewiesen werden, dies bedeutet, dass das Bakterium die notwendige Energie aus der Oxidation des gelösten zweiwertigen zu dreiwertigem Eisen bezieht. Durch eine weitere Reaktion wird das dreiwertige Eisen als Eisenoxid ausgeschieden, dadurch verkrusten die Bakterien häufig. Hierbei ist *Gallionella* zur Synthese seiner Biomasse nicht auf organischen Kohlenstoff angewiesen, sondern greift auf den im Wasser gelösten Kohlenstoff zurück. Auch wenn *Gallionella* die häufigste Gattung der Eisenbakterien ist, sind dort auch weitere Gattungen vertreten, die vermutlich keine primären Eisenabscheider sind. Von diesen leben viele heterotroph, sodass für sie organischer Kohlenstoff zum Aufbau der Zellsubstanz notwendig ist. Neben Eisenbakterien sind auch Manganbakterien im Boden und im Grundwasserleiter vorhanden, die Mangan(II) zu unlöslichem Mangan(III, IV) oxidieren. Da

---

weder Eisen- noch Manganbakterien pathogen wirken, sind sie aus trinkwasserhygienischer Sicht unproblematisch. (HOUBEN & TRESKATIS, 2003, S. 91f.)

Wie bei Entnahmebrunnen sind auch bei Infiltrationsorganen Eisen- und Manganbakterien anzutreffen, die unter Umständen eine Verockerung bedingen. Dabei ist der Alterungsprozess der Verockerung erstrangig an unterirdischen Infiltrationsanlagen zu beobachten. Bei den Infiltrationsanlagen ist der Ort der größten Geschwindigkeit der Bereich mit dem geringsten Korndurchmesser und damit mit der geringsten Durchlässigkeit. Die hohe Geschwindigkeit und die Infiltrationsmenge sorgen dabei dafür, dass trotz eines geringen Eisen- und Mangangehalts des Infiltrationswassers dennoch eine ausreichend Fracht an Nährstoffen vorliegt. Die ausgefallten Eisen- und Manganoxide reichern sich im Filtermaterial an, wodurch eine Kolmation resultiert. Infolgedessen reduziert sich die Infiltrationsleistung der Anlage, die bei zu geringer Leistung regeneriert oder aufgegeben werden muss. Dabei hängt es vom Ort der Alterung ab, ob eine Regenerierung durchführbar ist. Mit einem feineren Filtermaterial oberhalb der eigentlichen Verfüllung der Infiltrationsanlage als zusätzliche Filterschicht kann die Verockerung auf diesen Bereich womöglich begrenzt werden. Fraglich ist hierbei jedoch, ob nicht gerade durch eine solche Schicht und den dadurch resultierenden Fließgeschwindigkeiten eine Verockerung induziert wird. Jedoch ist auf lange Sicht eine Kolmation durch Verockerung bei entsprechenden Randbedingungen nicht zu vermeiden. Ein optimierter Betrieb sowie eine Optimierung der Regenerierungsmöglichkeiten können aber die Betriebskosten senken.

#### 4.1.2 Versinterung

Die Bildung von Carbonaten und die Ablagerung dieser in den Filterrohrschlitzen sowie in der Kiesschüttung werden in der Wasserwirtschaft als Versinterung bezeichnet. Die Carbonate bilden sich aus Bicarbonaten, die im Grundwasser in gelöster Form vorhanden sind, vorausgesetzt dieses Wasser enthält überschüssige Kohlensäure (CO<sub>2</sub>) oder es befindet sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht. Wird dieses Gleichgewicht unterschritten können die Bicarbonate nicht in Lösung gehalten werden, da die verbliebene Kohlensäure nicht ausreichend ist. Dadurch bilden sich unlösliche Carbonate, die zu Inkrustationen führen. Die vereinfachte chemische Reaktionsgleichung für diesen Vorgang ist mit Formel (4.4) gegeben. (Verein zur Förderung des Instituts WAR, 1980, S. 6f.)



Das Grundwasser durchströmt in der Regel die unterirdischen Infiltrationsanlagen. Beim Eintritt in die Anlage und bei der Vermischung mit dem Infiltrationswasser können eine große Anzahl an physikalischen und chemischen Parametern im Wasser verändert werden. Zu den Parametern, die speziell für die Löslichkeit der Kohlensäure wichtig sind, zählt unter anderem eine niedrige Temperatur. Die Temperatur des Infiltrationswassers kann abhängig von der genutzten Wasserquelle teilweise stark schwanken und auch 25 °C erreichen. Dies kann bei der Vermischung der Wässer zur Ausgasung von Kohlensäure führen, was eine Übersättigung des Wassers an Carbonaten zur Folge hat. Dadurch wiederum werden Carbonate ausgefällt, die die Poren im Infiltrationsorgan zusetzen können. Zusätzlich dazu sorgt die Ausgasung von Kohlensäure dafür, dass durch die Gasblasen die Poren blockiert werden und dem Wasser weniger Raum zur Infiltration zur Verfügung steht.

In reiner Form kommen Carbonat-Inkrustationen nur in stark carbonathaltigem Grundwasser vor, beispielsweise bei Lockergesteinsgrundwasserleitern mit hohem Kalkanteil oder in Karstgebieten. Im Vergleich zur Verockerung spielt die Versinterung im Allgemeinen bei der Alterung eine deutlich geringere Rolle. Als Nebenbestandteile können Karbonate mit geringen Anteilen bei der Verockerung entstehen. (HOUBEN & TRESKATIS, 2003, S. 100)

---

### 4.1.3 Algenbildung

Ein weiterer Prozess, der sich bei offenen und damit in der Regel bei oberirdischen Infiltrationsanlagen zeigt, ist die durch die Sonneneinstrahlung bedingte Algenbildung. Diese verringert durch die vorhandene Biomasse nicht nur die für die Infiltration wasserwegsamem Poren im Filtermaterial, sondern sorgt durch die Verwurzelung auch für eine Verdichtung des Filtermaterials. Aufgrund der resultierenden geringeren Durchlässigkeit der Medien wird zudem die Infiltrationsleistung verringert. Die effektivste Maßnahme zur Verhinderung einer Algenbildung ist die Abdeckung des Infiltrationsorgans, sodass keine Sonnenstrahlen mehr in die Anlage eindringen können. Allerdings ist dies aufgrund der Bauform sowie der Größe der oberirdischen Infiltrationsorgane und der damit verbundenen hohen Aufwendung oft nicht realisierbar. Daher müssen diese Anlagen regelmäßig entkrautet werden, um eine ausreichend hohe Infiltrationsleistung gewähren zu können. (Bundesministerium des Inneren, 1985, S. 207ff.)

### 4.1.4 Feststoffe aus Rohrleitungen

Je nach Infiltrationsbetrieb kann es in den Rohrleitungen zu den Infiltrationsanlagen zu Stagnation von Wasser kommen. Hierbei bilden sich Ablagerungen in den Rohren, die bei wieder Inbetriebnahme durch die Wasserströmung mobilisiert werden können und anschließend bis in die Anlage transportiert werden. Dort setzen sich die Feststoffe im Filtermaterial ab und sorgen dadurch für eine Verringerung der Infiltrationsleistung. Damit diese Feststoffe nicht zu tief in die Anlage eintreten können, kann über der eigentlichen Verfüllung des Organs eine weitere Filterschicht mit einer Mächtigkeit von wenigen Dezimetern aufgebracht werden, deren Korndurchmesser geringer ist. Dadurch kann erreicht werden, dass sich die Feststoffe in diesem Bereich absetzen.

### 4.1.5 Sauerstoffeintrag

Mit dem Infiltrationswasser wird Sauerstoff in das Grundwasser über die Infiltrationsanlage eingetragen. Je nach Beschaffenheit der Wässer kann dies zur Oxidation im Grundwasser vorhandener Stoffe führen, die sich in der Anlage selbst oder im Anstehenden in den Porenräumen absetzen und dadurch eine Kolmation verursachen. Da das Infiltrationswasser in der Regel eine höhere Temperatur aufweist als das Grundwasser, kann es bei der Vermischung der Wässer zur Ausgasung von Sauerstoff aus dem Infiltrationswasser kommen. Auf dem Weg nach oben aus dem Filtermaterial heraus werden diese Gasblasen vom entgegenströmenden Infiltrationswasser gehemmt. Durch die Blasen verringert sich die wasserwegsame Infiltrationsfläche und damit auch die Infiltrationsleistung.

Einen ähnlichen Effekt hat ein intermittierender Betrieb der Infiltration: Durch den Infiltrationsstopp gelangt Luft in die Porenräume des eingebrachten Filtermaterials. Bei Wiederinbetriebnahme der Infiltration entweicht die Luft wieder aus dem Filter, wird aber auf dem Weg vom Wasser gehemmt. Dadurch kann es einige Zeit dauern, bis nach der Wiederinbetriebnahme die ursprüngliche Infiltrationsleistung wieder erreicht wird. Dies ist dabei kein eigentlicher Alterungsvorgang an den Infiltrationsanlagen, sondern ein vorübergehender Zustand, der aber als Alterung fehlinterpretiert werden kann. Ein langsames Anfahren des Betriebs ist hierbei empfehlenswert, um die Gasblasen aus dem Porenraum bestmöglich verdrängen zu können.

### 4.1.6 Viskosität des Wassers

Die Viskosität des Wassers trägt ebenso zu einer Verringerung der Infiltrationsleistung bei und damit ggf. zu einer Fehleinschätzung möglicher Alterungsprozesse an Infiltrationsorganen. Diese ist dabei abhängig von der Temperatur des Infiltrationswassers. Je höher die Temperatur des Wassers desto geringer ist die Viskosität. Das führt dazu, dass bei ansonsten gleichen Randbedingungen die Infiltrationsleistung bei Wasser mit vergleichsweise hoher Temperatur höher ist als bei Wasser mit geringer Temperatur. Eine genaue Einschätzung bzw. Quantifizierung des alleinigen Einflusses der

---

Viskosität auf die Infiltrationsleistung ist jedoch aufgrund der natürlich schwankenden Randbedingungen im Gelände erschwert.

Eine Berechnung der Viskosität bei verschiedenen Temperaturen zeigt den Unterschied in den resultierenden Werten. Unter Verwendung der Gleichung (2.15) ergibt sich die Viskosität für ein Wasser mit der Temperatur 10 °C zu  $\eta = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ . Bei einer Wassertemperatur von 20 °C liegt die Viskosität bei  $1,01 \cdot 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ . Wie groß der Einfluss einer solchen Änderung der Temperatur des Wassers und damit der Viskosität auf die Infiltrationsleistung ist, wird durch die Simulation verschiedener Szenarien überprüft.

## 4.2 Alterung von Niederschlagswasserversickerungsanlagen

Auch bei der Versickerung von Niederschlagswasser kann es an den Anlagen zu Alterungserscheinungen kommen. Dazu gehören zum Beispiel die Verschlickung und Verdichtung des Bodens in oberirdischen Anlagen, wodurch sich die Durchlässigkeit stark verringert und sich die ursprüngliche Versickerungsleistung reduziert. Verantwortlich für die Abdichtung der Infiltrationsfläche sind dabei in erster Linie die mit dem Niederschlagswasser mitgeführten Stoffe, die sich in der Anlage absetzen und somit eine Kolmation begünstigen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, kann eine Sedimentationsanlage vorgeschaltet werden. Die oberirdischen Versickerungsanlagen müssen zusätzlich regelmäßig überprüft und Laubeinträge entfernt werden. Trotz regelmäßig durchgeführter Grünpflege kann es jedoch dazu kommen, dass die Infiltrationsleistung durch eine Kolmation zu stark beeinträchtigt wird. In solchen Fällen hilft meist nur noch ein Austausch der oberen Bodenschicht (DWA Arbeitsblatt DWA-A 138, 2005, S. 34).

Durch den Eintrag von Feststoffen können sich die Filterschichten im Versickerungsschacht zusetzen und die Versickerung beeinträchtigen. Dies kann durch eine vorgeschaltete Sedimentationsanlage verhindert werden. Fehlt eine solche Anlage jedoch kann dieser Alterungsprozess nicht vermieden werden, sodass eine Regenerierung der Anlage mit der Zeit unumgänglich ist. Die Regenerierung der Anlage erfolgt dabei durch Ausbau, Rückspülen und Wiedereinbau des eingesetzten Filtersacks oder durch das Abtragen der betroffenen Filterschicht und den Einbau einer neuen Schicht (DWA Arbeitsblatt DWA-A 138, 2005, S. 27).

Die Beschaffenheit des Niederschlags- und des Infiltrationswassers weichen je nach Herkunft voneinander ab. Die Inhaltsstoffe des Regenwassers werden durch die Staubbelastung in der Luft, die Flächennutzung und Niederschlagsdynamik bedingt. Mit dem Merkblatt DWA-M 153 ist ein Bewertungsverfahren für die Belastung des Regenwassers gegeben, die sich unter anderem nach den Einflüssen aus der Luft und der Verschmutzung der Oberflächen richtet. Die Verschmutzung der Oberflächen ist dabei abhängig von ihrer Nutzung und im speziellen bei Dachdeckungen von dem Material der Deckung. Bspw. führen unbeschichtete kupfer-, zink- und bleigedachte Dachflächen für hohe Metallkonzentrationen im ersten Regenabfluss. Das Bewertungsverfahren beruht auf einem Punktesystem, über welches das Niederschlagswasser in ein Wasser mit geringer, mittlerer und starker Belastung eingeteilt wird. Die Gewässer, in die das Niederschlagswasser eingeleitet werden soll, werden sogenannte Gewässerpunkte zugewiesen. Bei der Infiltration von Niederschlagswasser in das Grundwasser außerhalb von Wasserschutzgebieten bspw. darf die Belastungspunktzahl des Niederschlagswassers 10 Punkte nicht überschreiten. Durch verschiedene Behandlungsverfahren kann die Belastungspunktzahl verringert werden. Hierzu zählen unter anderem die Versickerung durch bewachsenen Oberboden oder auch der Einsatz einer Sedimentationsanlage. (HAZEN, 2007, S. 13ff.)

Von der Beschaffenheit und der Menge des eingeleiteten Wassers hängen der Zeitpunkt und die Art der Alterung ab. Die Anlagen zur Niederschlagsversickerung sind wie die zur künstlichen Anreicherung des Grundwassers in erster Linie von der Kolmation als Alterungsprozess betroffen. Deren Eintritt kann zeitlich verzögert, aber nicht komplett verhindert werden. Daher ist eine Regenerierung der Anlagen unausweichlich und sollte aus diesem Grund mit in den Planungsprozess integriert werden.



---

## 5 Wasserverband Hessisches Ried

---

In diesem Kapitel wird der Wasserverband Hessisches Ried (WHR) vorgestellt. Dabei wird zunächst auf das Gebiet des Hessischen Rieds näher eingegangen. Anschließend werden die Hintergründe der Gründung und die Aufgaben sowie die verschiedenen Infiltrationsanlagen des Wasserverbands Hessisches Ried dargelegt.

### 5.1 Hessisches Ried

Das Hessische Ried liegt in Südhessen und wird im Norden vom Main, im Westen vom Rhein und im Osten durch den Odenwald begrenzt. Die Landesgrenze zu Baden-Württemberg stellt die südliche Grenze des Gebiets dar. Damit erstreckt es sich über eine Fläche von etwa 1100 km<sup>2</sup>, mit einer Länge von über 60 km und einer Breite zwischen 15 und 20 km. Es gehört zum nördlichen Teil des Oberrheingrabens mit tertiären und quartären Ablagerungen. Mit seinen sandigen bis sandig-kiesigen Lockergesteinen, die oberhalb der pliozänen Schichten liegen, ist das Hessische Ried ein ergiebiger Porengrundwasserleiter und daher für die Wasserwirtschaft von großer Bedeutung. Aufgrund von Ton- und Schluffablagerungen kann örtlich eine Stockwerkstrennung des Grundwasserleiters vorliegen. Die vorhandene gute Wasserwegsamkeit im Untergrund und das geringe Gefälle hin zum Rhein führen dazu, dass das Hessische Ried ein nass-feuchtes Gebiet mit zeitweise sehr hohen Grundwasserständen ist. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S.6)(BGS UMWELT, 2008a, S. 15f.)

Die Niederschläge sind im Hessischen Ried maßgebend für die natürliche Grundwasserneubildung. Aber auch die unterirdischen Zuflüsse aus dem Odenwald und die Infiltration sowie Exfiltration der natürlichen Fließgewässer spielen eine Rolle. Das Hessische Ried gehört zum südwestdeutschen Klimaraum. Das Klima zeichnet sich daher durch milde Winter und warme Sommer aus. Im Vergleich zum Bundesdurchschnitt sind die Werte der mittleren Niederschlagshöhe mit 653 mm/a und der Jahresdurchschnittstemperatur mit 9,5 °C eher gering. Dabei teilt sich der Gesamtniederschlag zu etwa 56 % auf das hydrologische Sommerhalbjahr und zu etwa 44 % auf das hydrologische Winterhalbjahr auf. Dadurch, dass die Verdunstung wegen der klimatischen Bedingungen gemessen an den Niederschlägen relativ hoch ist, sind für die Grundwasserneubildung im Hessischen Ried erstrangig die Winterniederschläge bestimmend. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 6)(BGS UMWELT, 2008a, S. 17)

#### 5.1.1 Zeitliche Entwicklung

Um eine Ertragssicherung und –steigerung auf den Äckern und Wiesen erreichen zu können, war bereits im frühen Mittelalter das Bestreben nach Entwässerung der Landschaft bei den Bauern und Landesherren vorhanden. Der Beginn der Rheinbegradigung 1817 durch den Ingenieur Johann-Gottfried Tulla (1770-1828) stellt den Beginn der Landschaftsveränderung dar. Dabei war das primäre Ziel ein verbesserter Schutz vor Überflutungen, was durch das Abschneiden der Altarme des Rheins sowie dem Einengen und Begradigen des Flussbettes erreicht werden sollte. Ebenso sollte eine Austrocknung der Altarme und eine zusätzliche Gewinnung von fruchtbarem Ackerland ermöglicht werden. Für einen weiteren Schutz sorgte in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts der Bau von Hochwasserschutzdeichen am Rhein. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 6f.)

Mit dem „Generalkulturplan für das hessische Ried“, vorgelegt von Ministerialrat Heyl im Jahr 1929, folgte ein weiterer und gleichzeitig entscheidender Schritt zur Landschaftsumgestaltung des Hessischen Rieds. Neben zahlreichen Verbesserungsmaßnahmen sind zusätzlich auch ökologische Auswirkungen erfasst worden. Die hierfür notwendigen Arbeiten erfolgten Mitte der 1930er und 1940er Jahre und wurden in den 1970er Jahren abgeschlossen. Wie bereits erwähnt ist das Hessische Ried ein ursprünglich nasses Gebiet, jedoch wurde eine intensive landwirtschaftliche Nutzung durch

---

die Trockenlegung der feuchten Wiesen und Äcker ermöglicht. Somit konnte sich das Hessische Ried von einer unbewohnten ursprünglich nassen Flussauenlandschaft mit ausgedehnten Auenwäldern zu einer Kultur- und Agrarlandschaft entwickeln und neue Gemeinden gegründet sowie bereits bestehende ausgedehnt werden. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 7)

In den 1960er Jahren stieg der Wasserbedarf deutlich an. Dies ist in erster Linie auf die wachsende Wirtschaft sowie wachsende Einwohnerzahl zurückzuführen. Zeitweise führte dies sogar dazu, dass die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung nicht ausreichend gewährleistet werden konnte. Dies war vor allem im Ballungsraum Frankfurt der Fall. Um die Wasserversorgung wieder gewährleisten zu können, wurden mehrere große Wasserwerke innerhalb von zehn Jahren in Betrieb genommen, wodurch sich die Grundwasserförderung in diesem Zeitraum verdoppelte. Dies führte anschließend zu einer großflächigen Grundwasserabsenkung und zur Gründung des Wasserverbands Hessisches Ried (WHR). (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 8)

In den 1980er Jahren fand ein Umdenken in der Bevölkerung statt. Das Ziel war nun nicht mehr, das Oberflächenwasser so schnell wie möglich mittels der Gewässer abzuleiten, sondern es, sofern möglich, vor Ort dem Wasserkreislauf wieder zuzuführen. Die bereits im Generalkulturplan vorhandene ökologische Komponente wurde wieder aufgegriffen. Beispielsweise wurden einige Teilbereiche von Bächen renaturiert und in einen möglichst naturnahen Zustand überführt. Dennoch ist die Landschaftsumwandlung in vielen Teilen des Hessischen Rieds irreversibel. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 9)

### **5.1.2 Grundwasserstände**

Großräumig gesehen ist der Grundwasserstrom im Hessischen Ried von Ost nach West hin zum Rhein gerichtet. Jedoch werden die Pegelstände des Rheins von seinem großen Einzugsgebiet bestimmt und sind weitgehend unabhängig vom zuströmenden Grundwasser aus dem Hessischen Ried. Andersherum beeinflusst der Rhein hingegen deutlich die Grundwasserstände im Hessischen Ried, da bei Hochwasser sich die Gefälleverhältnisse umkehren. Dadurch strömt Rheinwasser dem Grundwasser zu und führt gebietsweise zu einer Erhöhung des Grundwasserstands. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 24ff.)

Auch die Pegelstände der größeren Nebenflüsse Weschnitz, Winkelbach und Modau sind weitgehend vom Grundwasserstand im Hessischen Ried unabhängig. Aus den Fließgewässern sickert Wasser dem Grundwasser zu, sofern der Wasserstand der Flüsse oberhalb der Grundwasseroberfläche liegt. Dadurch werden die Grundwasserstände in diesem Bereich stabilisiert. Im Gegensatz dazu steht der Schwarzbach der in einer wechselseitigen Beeinflussung mit dem Grundwasser steht. Über kleinere Bäche und Grabensysteme fließt das Grundwasser dem Schwarzbach zu. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 26f.)

Seit den 1950er Jahren wird das Grundwassermessstellennetz systematisch verdichtet. Zur Überwachung und Beobachtung der Grundwasserstände befinden sich in der Main- und Rheinebene insgesamt 430 Landesmessstellen und 2370 Messstellen von - unter anderem - Betreibern der Wasserwerke oder Deponien (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, o. J.). Dadurch können langjährige Grundwasserstandsganglinien erstellt und somit die zeitliche Entwicklung der Grundwasserstände überwacht und analysiert werden.

Abbildung 5-1 auf der folgenden Seite zeigt eine Grundwasserstandsganglinie von 1951 bis 2010 der Landesmessstelle 527172 in der Nähe von Trebur im Norden des Hessischen Rieds. Die Messstelle liegt außerhalb des Einflussbereichs von Brunnen sowie Infiltrationsstandorten und ist dadurch repräsentativ für den Verlauf des Grundwasserstandes über die Jahre. Der natürliche Jahresgang des Grundwassers ist gut zu erkennen mit hohen Grundwasserständen im Frühjahr und um etwa einen

Meter niedrigeren Ständen im Herbst. Durch die Abbildung wird ein weiteres Charakteristikum des Grundwassergangs im Hessischen Ried ersichtlich: Das Auftreten mehrjähriger Abschnitte besonders hoher sowie auch besonders niedriger Wasserstände. In den Jahren 1959-1960, 1971-1974, 1990-1993 und weniger ausgeprägt in den Jahren 2003-2006 zeigt die Wasserstandsganglinie ein Absinken des Grundwassers. Im Gegensatz dazu gab es in den Jahren 1965-1970, 1981-1983 und 2001-2003 Jahresabschnitte mit teilweise sehr hohen Grundwasserständen. Ursache für die Abschnitte extrem niedriger und hoher Wasserstände sind mehrjährige Trocken- und Nassperioden, die zu den in der Vergangenheit vorgekommenen Trockenheits- und Vernässungsschäden geführt haben (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 14).

### Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle 527172

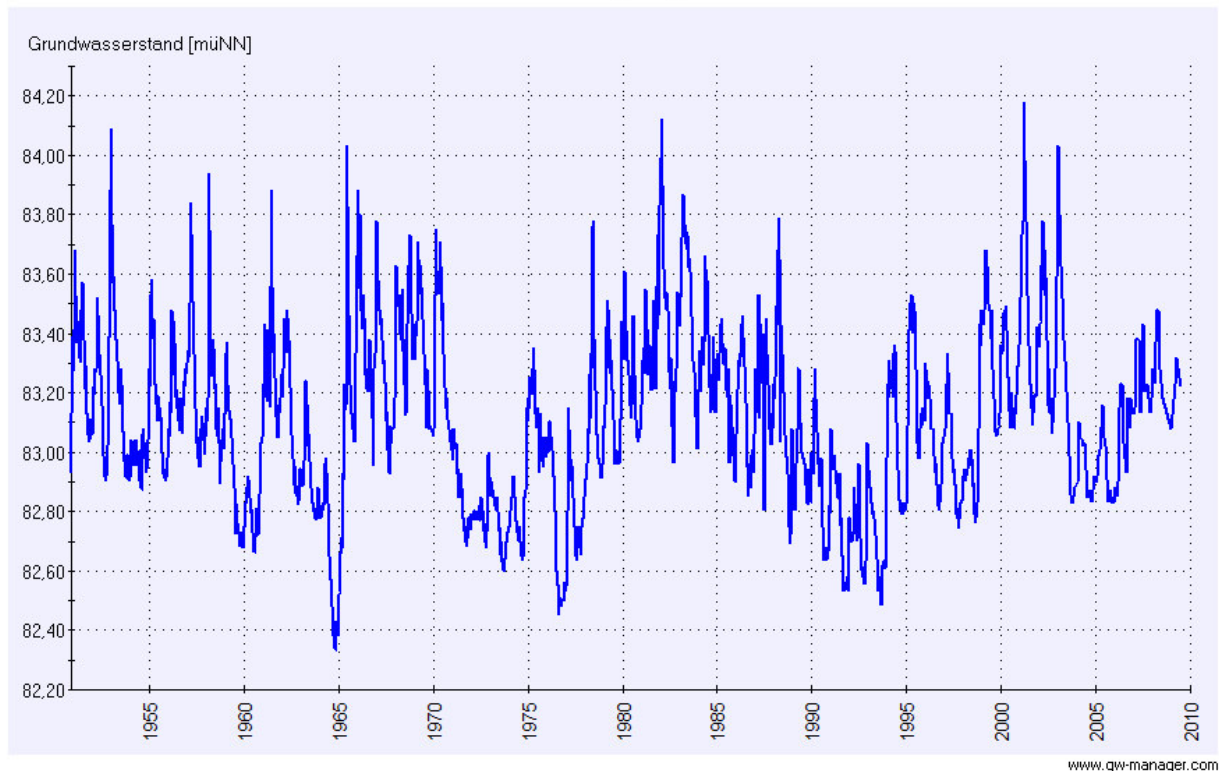


Abbildung 5-1: Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle 527172 bei Trebur

Die Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle 540018, welche am südöstlichen Rand des Jägersburger Waldes in der Nähe von Fehlheim liegt, die in Abbildung 5-2 auf der folgenden Seite dargestellt ist, zeigt über die Wechselwirkung mit dem Wetter hinaus eine weitere Einflussgröße der Grundwasserstände im Hessischen Ried: die Grundwasserförderung. Dabei liegt die Messstelle nicht im direkten Einflussbereich eines Entnahmebrunnens, jedoch im Umfeld verschiedener Wasserwerke. Die vermehrte Grundwasserförderung ab Ende der 1960er Jahre zur Sicherstellung der Wasserversorgung führte gebietsweise zu sehr starken Grundwasserabsenkungen. Diese Grundwasserabsenkung von bis zu drei Metern im Bereich der Landesmessstelle 544018 ist im Diagramm deutlich zu erkennen. Zudem sind die extrem niedrigen Grundwasserstände der Jahre 1976-1978 und 1991-1993 zu erkennen sowie die Hochstände der Jahre 1981-1983, 1988 und 1999-200, wobei diese nicht das Niveau von vor 1970 erreichen.

## Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018



Abbildung 5-2: Grundwasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 im Jägersburger Wald

### 5.1.3 Auswirkungen und Nutzungskonflikte

Im Hessischen Ried bestehen die klassischen Nutzungskonflikte zwischen Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Naturschutz, Siedlungsschutz und Wasserversorgung. Durch die Entwässerungsmaßnahmen des Generalkulturplans Hessisches Ried wurden die Bedingungen für die Land- und Forstwirtschaft verbessert. Die vermehrte Grundwasserförderung ab Ende der 1960er Jahre zur Sicherstellung der Wasserversorgung führte gebietsweise zu sehr starken Grundwasserabsenkungen. Im Zusammenhang mit der Trockenperiode von 1970-1977 führte dies zu schwerwiegenden Waldschäden, da die Wurzeln der Bäume das Grundwasser nicht mehr erreichten. Durch die abgesunkenen Grundwasserstände fielen viele flache Saugbrunnen trocken, die zur landwirtschaftlichen Beregnung genutzt wurden. Auch entstanden Setzungsschäden an Straßen, Wegen und Gebäuden. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 32f.)

Aufgrund des gesunkenen Grundwasserstandes konnten sich kleinere Städte und Gemeinden weiter ausdehnen und auch tiefliegende Flächen bebaut werden. Man sah keine Notwendigkeit für eine geeignete Abdichtung der Gebäude, da die Grundwasseroberfläche zu diesem Zeitpunkt deutlich tiefer lag und man die periodischen Schwankungen des Grundwassers nicht mit in die Planung einbezog. Durch die anschließende Nassphase 1981-1983 und den dadurch gestiegenen Grundwasserstand, der jedoch unter dem Niveau der 1950er und 1960er Jahre blieb, standen viele Keller im Hessischen Ried unter Wasser. Während der folgenden Trockenphase 1989-1992 und der Nassphase 1999-2003 wiederholten sich diese Gegebenheiten wieder, da neue Siedlungen in setzungs- und vernässungsgefährdeten Bereichen ohne ausreichenden Schutz gebaut wurden. Auch die Forstschäden verstärkten sich durch die erneute Trockenphase und es kam zu weiteren Beeinträchtigungen an Feuchtwiesen und der Vegetation des Pfungstädter Moores. Zahlreiche Infrastrukturbauwerke standen während der Nassphase 1999-2003 unter Wasser, auch viele landwirtschaftlich genutzte Flächen



---

waren überschwemmt. (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S. 33f.)

## **5.2 Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried**

Aufgrund der in dem vorherigen Abschnitt beschriebenen Problematik wurde ein Grundwasserbewirtschaftungsplan für das Hessische Ried von verschiedenen Institutionen und Behörden entwickelt der 1999 in Kraft trat (Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, 2005, S.47). Mit diesem Bewirtschaftungsplan werden Maßnahmen und Regeln für eine Verbesserung der Grundwasserverhältnisse festgelegt. Er dient als Instrument zur Umsetzung einer ökologisch verträglichen Grundwasserbewirtschaftung. Mit den formulierten Anforderungen an die Grundwasserentnahme und –anreicherung ist der Bewirtschaftungsplan eine entscheidende Voraussetzung für eine langfristig gesicherte Wasserversorgung im Rhein-Main-Gebiet. (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999, S. II/1)

Wesentliches Ziel des Grundwasserbewirtschaftungsplans ist die Regelung der Grundwasserentnahme, um die örtliche und regionale Wasserversorgung sicherzustellen (vgl. Regierungspräsidium Darmstadt 1999, S. 6). Durch die Regelungen soll gewährleistet werden, dass grundwasserabhängige Vegetationsstandorte nicht weiter gefährdet, bereits geschädigte Waldbereiche und Feuchtgebiete wenn möglich saniert sowie künftige grundwasserbedingte Nachteile für die Land- und Forstwirtschaft vermieden werden. Ebenso sollen setzungsempfindliche Bauwerke und Einrichtungen nicht geschädigt sowie Gebäudevernässungen und unzulässig hohe Grundwasserstände vermieden werden. (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999, S. II/5)

Die Grundwasserneubildung im Hessischen Ried hängt von verschiedenen Faktoren ab und weist jährlich zum Teil relativ große Unterschiede auf. Da die natürliche Grundwasserneubildung eine mögliche Grundwasserförderung begrenzt, soll durch die Infiltration von aufbereitetem Rheinwasser der Grundwasserhaushalt stabilisiert und somit eine fortlaufende Wasserversorgung gewährleistet werden. Des Weiteren soll durch einen sparsamen Umgang mit Wasser und die Substitution von Trinkwasser durch Brauchwasser eine rationelle Wasserverwendung erzielt werden. Demnach soll unter anderem die Entnahme von Grundwasser auf solche Fälle begrenzt werden, in denen anderes Wasser nicht eingesetzt werden kann. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von Oberflächenwasser oder aufbereitetem Rheinwasser zur landwirtschaftlichen Beregnung. Diese rationelle Wasserverwendung in Kombination mit der Infiltration von aufbereitetem Rheinwasser soll die Situation im Hinblick auf die begrenzte Verfügbarkeit von geeigneten Wasserressourcen verbessern. (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999, S. 26ff.)

In Abschnitt 8 des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried werden die aus forstwirtschaftlicher Sicht angestrebten mittleren Grenzflurabstände grundwasserabhängiger Biototypen des Hessischen Rieds aufgelistet. Demnach sind beispielsweise für die Niedermoore der Altnackarlachen ein Grenzflurabstand von 0 m anzustreben, wobei ein Schwankungsbereich von 0 m bis 0,5 m zulässig ist. Ebenso werden drei verschiedene Waldgebietstypen für das Hessische Ried mit unterschiedlichen Bewirtschaftungszielen definiert. Dazu zählen unter anderem die Schadensgebiete, in welchen die Grundwasserabsenkungen folgenschwere Waldschäden verursacht haben. Diese sollen dementsprechend saniert werden und es sind langfristig mittlere Grenzflurabstände von 1,50 m zu erreichen, wie beispielsweise in Teilen des Jägersburger Waldes. Diese Forderungen stehen jedoch im Konflikt mit den Anforderungen der Landwirtschaft und mit dem Siedlungsschutz. Die Richtwerte mittlerer Grundwasserstände wurden unter Berücksichtigung der Forderungen der verschiedenen Bereiche festgelegt, wobei diese aufgrund der Gegensätzlichkeit nicht voll realisierbar waren. (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999, S. 66ff.)



---

In Abschnitt 9 des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried sind die Anforderungen an die Grundwasserentnahme und Grundwasseranreicherung festgelegt. Durch die künstliche Grundwasseranreicherung sowie in einem begrenzten Umfang durch eine Entsiegelung von Flächen soll auf das verfügbare Grundwasserdargebot Einfluss genommen werden. Es werden Grenzflurabstände und Mindestgrundwasserstände definiert an denen sich die Grundwasserentnahme und die Infiltration orientieren. Zusätzlich werden Richtwerte mittlerer Grundwasserstände an ausgewählten Referenzmessstellen festgelegt, welche „die fachspezifisch definierten, naturräumlichen und nutzungsspezifischen Anforderungen an den Grundwasserflurabstand und die örtlichen Gegebenheiten des Grundwasserhaushaltes“ berücksichtigen (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999, S. 79). Bei der Festlegung dieser Richtwerte wurden ebenso mittlere Fördermengen für die im Gebiet enthaltenen Entnahmebrunnen sowie die Grundinfiltration für die Infiltrationsstandorte berücksichtigt. Eine dieser Referenzmessstellen mit einem Richtwert ist die Messstelle 544018, deren Grundwasserstandsganglinie in Kapitel 5.1.2 inklusive der Darstellung des Richtwertes bereits aufgeführt ist. (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999, S. 74ff.)

Durch die künstliche Grundwasseranreicherung mit aufbereitetem Rheinwasser erfolgt eine Stabilisierung des Grundwasserhaushalts. Dies ist die Aufgabe des Wasserverbands Hessisches Ried. Die Wasserrechte zur Infiltration belaufen sich dabei im Mittel auf 42,5 Mio. m<sup>3</sup>/a bzw. im Maximum auf 48,7 Mio. m<sup>3</sup>/a. Jedoch wird die tatsächliche Infiltrationsmenge durch die Aufbereitungsleistung des Wasserwerks Biebesheim und die für die landwirtschaftliche Beregnung bestimmte Menge bedingt. (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999, S. 86f.)

In den Gebieten, in denen eine künstliche Grundwasseranreicherung durchgeführt wird, hat sich mittlerweile die Grundwassersituation deutlich verbessert. Durch die Erhöhung der Infiltrationsmengen wird in Trockenphasen ein Absinken des Grundwasserstandes unter einen vorgegebenen Minimalwert verhindert. Hingegen wird während Nassphasen die Infiltration verringert oder komplett eingestellt, um die natürliche Vernässungsgefahr nicht zu fördern. Jedoch sind im Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried lediglich Maßnahmen enthalten, mit denen niedrige Grundwasserstände und die damit einhergehenden Schäden vermieden werden sollen. Es sind keine Maßnahmen erwähnt, die bei Grundwasserhochständen ergriffen werden können, um die daraus resultierenden Vernässungsschäden zu vermeiden.

### **5.3 Wasserverband Hessisches Ried**

Aufgrund der zuvor beschriebenen Problematik im Hessischen Ried wurde 1979 mit dem Wasserverband Hessisches Ried (WHR) eine Körperschaft des öffentlichen Rechts gegründet, welche sich mit der Verbesserung der Grundwasserverhältnisse befasst. Ende 2014 wurde dessen Organisationsstruktur geändert und somit in die zwei Verbände Wasserverband Hessisches Ried und Beregnungsverband Hessisches Ried aufgeteilt. Deren Mitglieder sind die Hessenwasser GmbH & Co. KG, der Wasser-, Boden- und Landschaftspflegeverband Hessen, der Wasserbeschaffungsverband Riedgruppe Ost (Einhausen), der Landkreis Bergstraße, der Landkreis Darmstadt-Dieburg, der Landkreis Groß-Gerau und die Stadt Darmstadt. (Wasserverband Hessisches Ried, o. J.)

Die Verantwortlichkeit der Rheinwasseraufbereitung in Biebesheim und die Grundwasseranreicherung in Südhessen trägt der Wasserverband Hessisches Ried als Infiltrationsverband. In der Satzung des WHR werden mit §3 die Aufgaben des Verbandes dargelegt. Dazu zählt vordergründig die Grundwasseranreicherung im Grundwasserkörper Hessisches Ried im Einzugsbereich der Grundwasserförderanlagen der großen Wasserwerke. Ziele der Infiltration sind dabei die zweck- und zielgerichtete Erhöhung des Grundwasserdargebots, die Erreichung des Zieles der Stabilisierung der Grundwasserstände gemäß des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried und der Schutz der Naturräume im Wirkungsbereich der Verbandsanlagen. (Wasserverband Hessisches Ried, 1989b, 2015, S. 193ff.)

---

Die Aufgaben des Beregnungsverbands Hessisches Ried sind in der entsprechenden Satzung festgelegt. Dazu gehört in erster Linie die Bereitstellung und Verteilung von Wasser zur landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Beregnung im Verbandsgebiet. Die dafür benötigten Wassermengen werden vom Wasserverband Hessisches Ried bezogen. (Beregnungswasserverband Hessisches Ried, 2015, S. 204)

### **5.3.1 Wasserwerk Biebesheim**

Das Wasser, welches für die landwirtschaftliche Beregnung und die künstliche Grundwasseranreicherung vorgesehen ist, wird aus dem Rhein im Biebesheimer Rheinbogen entnommen und im Wasserwerk Biebesheim aufbereitet, welches 1989 in Betrieb genommen wurde (Wasserverband Hessisches Ried, 1989b, S. 5). Das Oberflächenwasser wird dabei über ein mehrstufiges System zu Wasser mit Trinkwasserqualität aufbereitet, wobei physikalische, chemische und mikrobiologische Aufbereitungsverfahren eingesetzt werden. Das technische Multi-Barrieren-System setzt sich zusammen aus einer mechanischen Reinigungsstufe, Vorozonung, Primärflockung, Sedimentation in Form eines Absetzbeckens, Hauptozonung, Sekundärflockung, Mehrschichtfiltration und abschließend einer Aktivkohlefiltration. Aufgrund der Verwendung des Wassers zur Grundwasseranreicherung bleiben mikrobiologische Anforderungen unberücksichtigt und es wird keine Desinfektion des Wassers durchgeführt. Jährlich können 43 Mio. m<sup>3</sup> Oberflächenwasser in Biebesheim aufbereitet werden, wobei 38 Mio. m<sup>3</sup>/a für die künstliche Grundwasseranreicherung vorgesehen sind und 5 Mio. m<sup>3</sup>/a für die landwirtschaftliche Beregnung. Über Fernleitungen wird das aufbereitete Wasser vom Wasserwerk zu den Beregnungsflächen und Infiltrationsstandorten geleitet. (MIKAT & WEBER, 2011a, S. 45)

Die Beschaffenheit des entnommenen Rheinwassers und die Qualität des aufbereiteten Rheinwassers werden regelmäßig überprüft. Nach der Aufbereitung liegt die Konzentration von Eisen und Mangan unter den entsprechenden Richtwerten der Trinkwasserverordnung 2001. Im Jahr 2005 lagen die Werte für Eisen bei 204 Untersuchungen im Mittel bei 0,007 mg/l und für Mangan bei 0,0002 mg/l (BGS UMWELT, 2008a, Anlage I-9)

### **5.3.2 Infiltrationsanlagen**

Die Grundwasseranreicherung im Hessischen Ried wird in die vier Standorte Gernsheimer Wald, Jägersburger Wald, Lorscher Wald und Eschollbrücken/Pfungstadt unterteilt. Ein Übersichtslageplan der bestehenden und geplanten Infiltrationsanlagen ist mit Anlage A.1 gegeben. Jede Anlage besteht dabei aus einer unterschiedlichen Anzahl an Infiltrationsorganen in Form von Versickerungsbecken, Sickerschlitzen, Schluckbrunnen und Kiesbohrlöchern sowie aus zur Infiltration genutzten ehemaligen Entwässerungsgräben. Die Bezeichnung der Infiltrationsorgane ist standortbezogen.

Die Gesamtinfiltration wird in unterschiedliche Komponenten unterteilt. Dazu gehört die Grundinfiltration, welche die unter klimatisch mittleren Verhältnissen notwendige Infiltration zur Einhaltung der Vorgaben des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried darstellt. Die zusätzlich benötigte Infiltration zur Einhaltung der Vorgaben in Trockenjahren wird Zusatzinfiltration genannt. Unter Dargebotserhöhung wird diejenige Infiltration verstanden, die als Ausgleich für erhöhte Grundwasserentnahmen eingesetzt wird, um eine bilanzneutrale Fördermengenerhöhung gewährleisten zu können. Alle diese Komponenten der Infiltration werden zusammengefasst als Gesamtinfiltration bezeichnet. Mit Waldinfiltration wird die Infiltration definiert, die zum Erreichen waldökologischer Grundwasserstände in dem von Hessen-Forst in einem Aufspiegelungskonzept angegebenen Aufspiegelungszentren benötigt wird. Das Aufspiegelungskonzept von Hessen-Forst befindet sich derzeit noch in der Planungsphase und wurde daher noch nicht umgesetzt. (BGS UMWELT, 2008b, S. 8)

Tabelle 5-1: Auflistung der verschiedenen Infiltrationsmengen

Infiltrations- anlage	Grundinfiltration	Zusatzinfiltration	Dargebotserhöhung	Gesamtinfiltration
	[m³/a]	[m³/a]	[m³/a]	[m³/a]
Eschollbrücken/Pfungstadt	2.500.000	2.000.000	4.100.000	8.600.000
Gernsheimer Wald	6.300.000	2.000.000	3.600.000	11.900.000
Jägersburger Wald	4.500.000	1.300.000	600.000	6.400.000
Lorscher Wald	2.000.000	700.000	600.000	3.300.000
Summe	15.300.000	6.000.000	8.900.000	30.200.000

In Tabelle 5-1 sind die Infiltrationsmengen der Grund- und Zusatzinfiltration sowie der Dargebotserhöhung für die Infiltrationsstandorte Eschollbrücken/Pfungstadt, Gernsheimer Wald, Jägersburger Wald und Lorscher Wald aufgelistet. Die Werte beziehen sich hierbei auf das Konzept von Oktober 2018 für Normaljahre und mittlere Wasserstände. Die Mengen für die beiden Komponenten Grundinfiltration und Dargebotserhöhung sind standortspezifisch und richten sich nach örtlichen Gegebenheiten des jeweiligen Standorts sowie der Entnahmemenge der entsprechenden Förderbrunnen. Die Zusatzinfiltration während Trockenperioden liegt jedoch für alle Standorte bei etwa 2 Mio. m³/a. Zur Vermeidung von Vernässungsschäden infolge der künstlichen Grundwasseranreicherung wurden mit einem wasserrechtlich verbindlichen Betriebsreglement Ab- und Wiederanschaltwerte für die Infiltration auf Grundlage des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried definiert. (MIKAT & WEBER, 2011a, S. 46ff.)

Im Oktober 1989 wurde mit der Infiltration am Standort Eschollbrücken/Pfungstadt begonnen. Dort werden vorwiegend Sickerschlitzzgräben für die künstliche Grundwasseranreicherung verwendet. Für den Standort Gernsheimer Wald wurde die sogenannte aufgelöste Bauform entwickelt. Diese besteht aus fünf Kiesbohrlöchern mit einer Endteufe von 9 m oder aus sieben Kiesbohrlöchern mit einer Endteufe von 6 m mit jeweils einem Bohrdurchmesser von 1,5 m. Im Vergleich zu einem Sickerschlitzzgraben stellt diese Variante einen deutlich geringeren Eingriff in die Natur dar, bei rechnerisch gleichbleibender Infiltrationsleistung. Die Bohrlöcher sind mit Kies verfüllt und zu Beginn der Infiltration wurde diese Schicht durch ein Vlies von der darüber liegenden 20 cm mächtigen Filtersandschicht getrennt. Die Filtersandschicht wird eingesetzt, um mögliche Feststoffe aus der Transportleitung abzufangen. Nach kurzer Zeit nahm die Infiltrationsleistung jedoch stark ab. Diverse Untersuchungen ergaben, dass sich in dem Vlies vermehrt Bakterien angesiedelt haben und dadurch eine Kolmation hervorgerufen wurde. Die Bakterien verwendeten dabei die in dem Vlies vorhandenen Rückstände der Tenside, die bei der Produktion verwendet werden, für ihren Stoffwechsel. Daher wird nun auf die Verwendung eines Trennvlieses zwischen den beiden Filterschichten verzichtet.

Auch ohne Trennvlies zeigte sich mit der Zeit ein Leistungsrückgang der Infiltration an den Kiesbohrlöchern, der jedoch nicht im gleichen Umfang an den Sickerschlitzzgräben zu beobachten war. Untersuchungen ergaben, dass sich trotz des geringen Eisengehalts des Infiltrationswassers in dem oberen Bereich der Filtersandschicht vorwiegend Eisenoxide ablagern, die zu einer Kolmation in diesem Bereich führen. Aufgrund dieser Problematik und zur Aufrechterhaltung der Infiltrationsleistung werden die Kiesbohrlöcher etwa einmal im Jahr regeneriert, wobei der betroffene Teil der Filtersandschicht abgetragen wird und ein neuer Sand aufgebracht wird. Mit der Durchführung einiger Untersuchungen wollte der Wasserverband Hessisches Ried weitere die Infiltration beeinflussende Parameter identifizieren, deren Ergebnisse im folgenden Kapitel 6 kurz erläutert werden.

### 5.3.2.1 Gernsheimer Wald (Allmendfeld)

In dem Übersichtsplan A.3 in Anlage A sind die Infiltrationsorgane des Standorts Gernsheimer Wald dargestellt. Wie die Bezeichnung des Standorts bereits zeigt, liegen die betroffenen Infiltrationsorgane im Gernsheimer Wald, der sich zwischen der Stadt Gernsheim und der Gemeinde Alsbach-Hähnlein

befindet. Bei diesem Standort wurde die neu entwickelte Bauform mit Kiesbohrlöchern umgesetzt. Dabei wurde zunächst keine wasserrechtlich Erlaubnis erteilt, Infiltrationsorgane mit einer tieferen Endteufe als 6 m zu errichten, sodass zur Erreichung einer rechnerisch gleichen Infiltrationsleistung sieben Bohrlöcher pro Organ notwendig waren. Lediglich ein Organ dieses Standorts wurde bestehend aus fünf Kiesbohrlöchern mit einer Endteufe von 9 m umgesetzt, um die zu Beginn bestehenden Bedenken an dieser Umsetzung zu beseitigen. Ab Januar 1994 wurde mit der Infiltration an dem einzigen Sickerschleitzgraben (Organ 2) dieses Standorts und an Bauform mit fünf Kiesbohrlöchern begonnen. Die Kiesbohrlochgruppen 6-9 wurden ab März 1996, die Gruppen 1, 3, 5 und 10-12 ab August 1996 und die restlichen ab September 1996 in Betrieb genommen. Zusätzlich zu diesen Organen wird die künstliche Grundwasseranreicherung im Bereich des Gernsheimer Waldes durch die Einleitung von Wasser in Abschnitte der ehemaligen Entwässerungsgräben Landgraben, Rotgraben, Kohlbruchgraben und Waldseitengraben ergänzt. Eine Auflistung aller Organe des Standorts Gernsheimer Wald befindet sich in Anlage E mit den entsprechenden Daten der Inbetriebnahme.

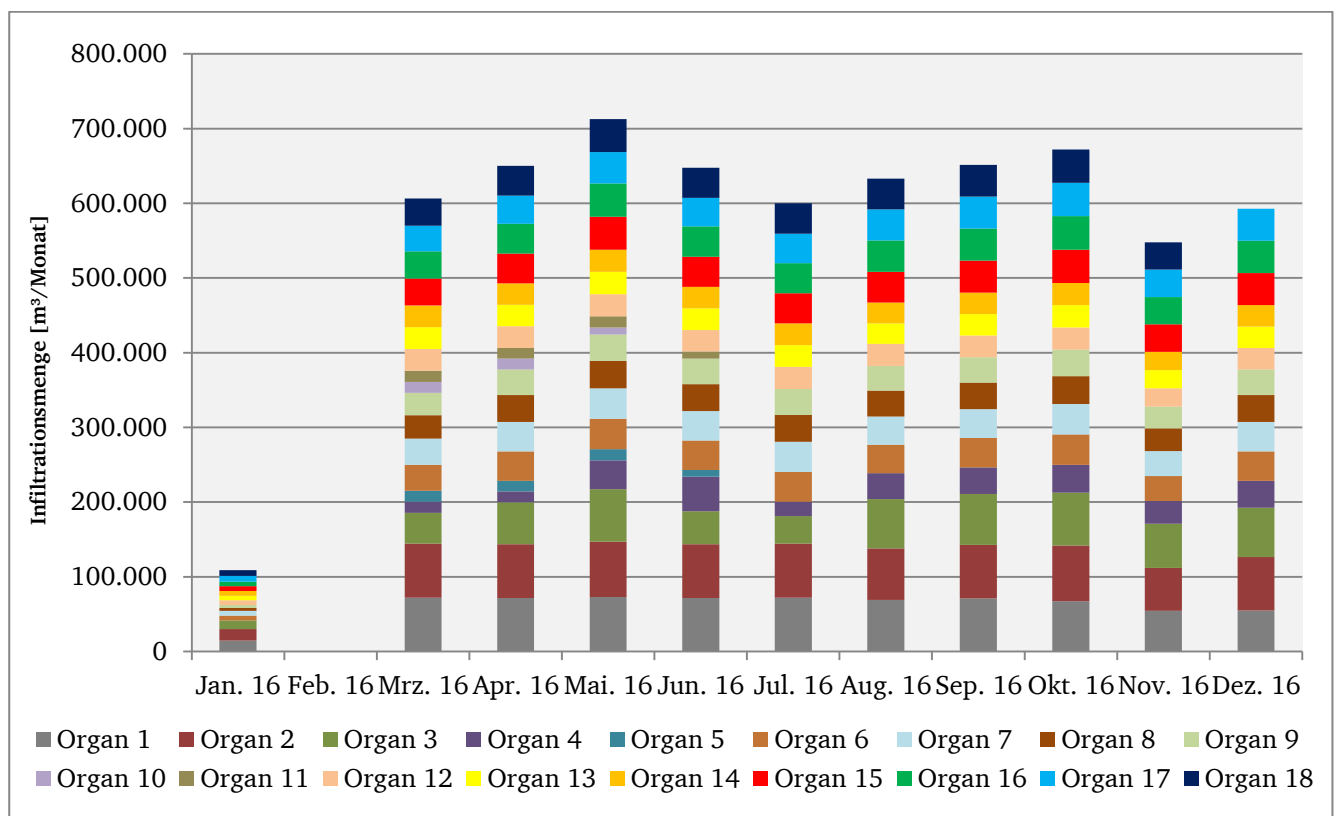


Abbildung 5-3: Monatliche Infiltrationsmengen der Organe 1 - 18 des Standorts Gernsheimer Wald

In der oben stehenden Abbildung 5-3 sind die gesteuerten monatlichen Infiltrationsmengen der Organe 1 – 18 des Standorts Gernsheimer Wald für das Jahr 2016 aufgetragen. Die Infiltrationsorgane sind für eine maximale Leistung von 125 m³/h ausgelegt, die Infiltrationsmenge wird jedoch abhängig vom Grundwasserstand zur Erreichung der Richtwerte gesteuert. Zu Beginn jedes Jahres findet die jährliche Revision des Wasserwerks Biebesheim statt, sodass in dieser Zeit kein Wasser infiltriert wird. Dies ist im Diagramm durch die verminderte Infiltrationsmenge im Januar zu erkennen sowie der nicht vorhandenen Infiltration im Februar. Falls an den Organen eine Regenerierung notwendig ist, wird dies in der Regel im Zeitraum der Revision durchgeführt, um eine zusätzliche Auswirkung auf den Betrieb zu vermeiden. Dadurch kann sich je nach Dauer der Regeneration die Infiltrationspause zu Beginn des Jahres ggf. verlängern. Abgesehen von diesem Zeitraum beläuft sich die monatliche Infiltrationsmenge etwa zwischen 550.000 und 700.00 m³.

Für die Modellierung eines Sickerschleitzgrabens fällt die Wahl auf das Infiltrationsorgan 2 im Gernsheimer Wald. Die als Versuchsorgan gebaute Anlage bietet eine ausreichende Datengrundlage für

die Erstellung eines Modells und verfügt aufgrund eines Infiltrationsversuchs über einen optimalen Datensatz für die Kalibrierung. Der Sickerschlitzzgraben wird in Kapitel 8 näher beschrieben.

### 5.3.2.2 Jägersburger Wald (bei Einhausen)

Der Übersichtsplan A.2 der Anlage A zeigt die Lage der Infiltrationsorgane des Standorts Jägersburger Wald, die Anlagen nördlich des Winkelbachs zählen zum Standort Gernsheimer Wald. Im Juli 1996 wurde die Infiltration von aufbereitetem Rheinwasser am Standort Jägersburger Wald zunächst am Waldgraben Groß-Rohrheim gestartet. Anschließend folgte die Einleitung in den Grenzgraben Biblis im Dezember 1997 sowie die Inbetriebnahme der Infiltrationsorgane 1-12 zwischen Oktober 1998 und Januar 1999. Bei beiden Gräben handelt es sich dabei um ehemalige Entwässerungsgräben, deren Sohle profiliert wurde. Jedes der zwölf Infiltrationsorgane umfasst fünf Kiesbohrlöcher, die auf einer etwa 80 m langen Strecke linienförmig angeordnet sind. Jede Bohrung weist einen Durchmesser von 1,5 m und eine Endteufe von 9 m auf. In Tabelle E-1 in Anlage E sind nochmals die einzelnen Infiltrationsorgane am Standort Jägersburger Wald mit dem Datum ihrer Inbetriebnahme aufgelistet.

In der folgenden Abbildung 5-4 sind die gesteuerten monatlichen Infiltrationsmengen der Organe 1 – 12 des Standorts Jägersburger Wald für das Jahr 2016 aufgetragen, welche ebenso eine rechnerische Infiltrationsleistung von 125 m<sup>3</sup>/h aufweisen. Auch hier ist die zu Beginn des Jahres deutlich reduzierte Infiltrationsmenge im Januar sowie die nicht vorhandene Infiltration in Februar mit der Revision des Wasserwerks Biebesheim zu erklären. Abgesehen von diesem Zeitraum liegt die minimale Infiltrationsmenge für das Jahr 2016 im November mit einem Wert von etwa 250.000 m<sup>3</sup>. Im Mai wird die maximale Menge von etwa 600.000 m<sup>3</sup> erreicht.

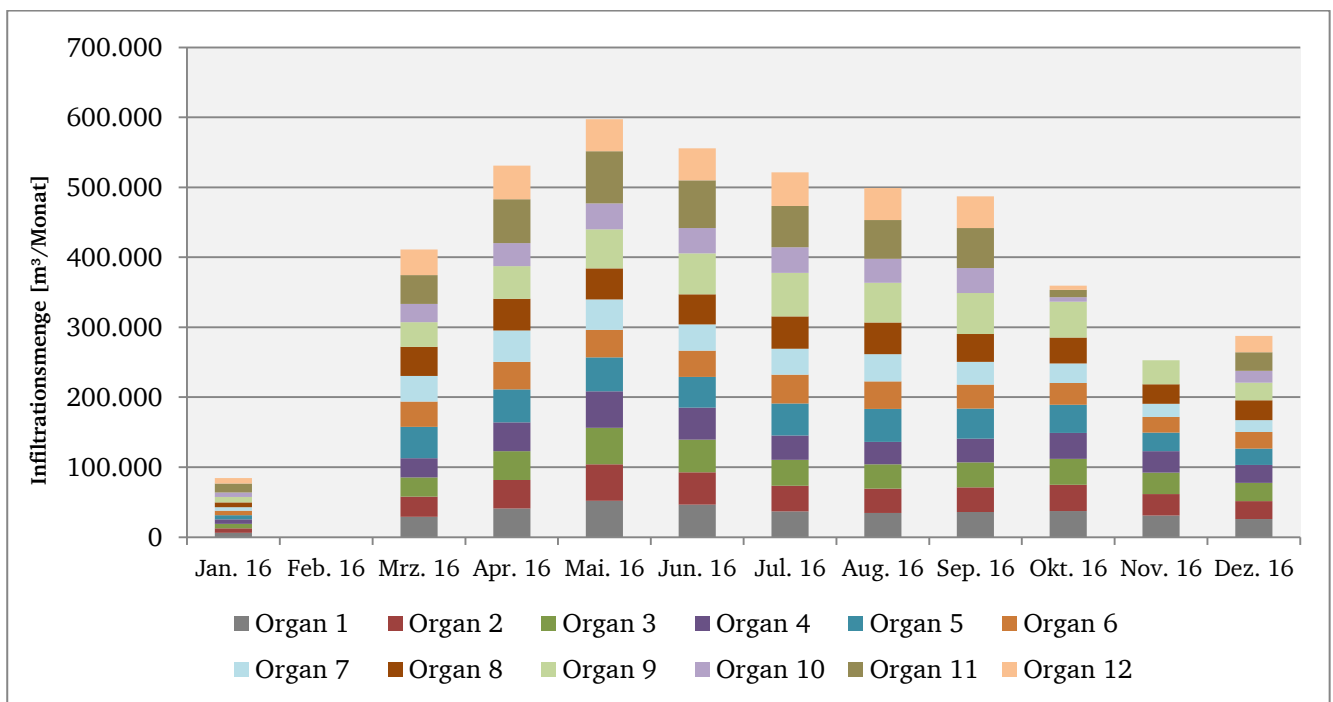


Abbildung 5-4: Monatliche Infiltrationsmengen der Organe 1 - 12 des Standorts Jägersburger Wald

Das Infiltrationsorgan 6 des Standorts Jägersburger Wald wird für die Modellierung eines Organs bestehend aus Kiesbohrlöchern verwendet. Wie bei dem Sickerschlitzzgraben im Gernsheimer Wald sind an diesem Organ Messeinrichtungen eingebaut worden, um eine gezielte Datenerhebung durchführen zu können, die an anderen Organen nicht möglich ist. Dadurch sind auch hier Daten vorhanden, die für die Kalibrierung des Modells verwendet werden können. Eine nähere Beschreibung des Infiltrationsorgans 6 des Jägersburger Waldes befindet sich in Kapitel 7.



---

### 5.3.2.3 Eschollbrücken/Pfungstadt und Lorscher Wald

Die Infiltrationsanlage Eschollbrücken/Pfungstadt gliedert sich in die Teilbereiche Eschollbrücken und Pfungstadt auf und umfasst neun Sickerschlitzgräben und ein Sickerbecken. Zusätzlich dazu gibt es noch eine Versuchsanlage, die sich aus einem Sickerbecken, einem Schluckbrunnen und zwei Sickerschlitzgräben zusammensetzt. Der Standort befindet sich nördlich der Stadt Pfungstadt und des Stadtteils Eschollbrücken. In der Übersichtskarte A.1 der Anlage A sind die Infiltrationsorgane im Norden der Karte abgebildet. Zusätzlich zu den bestehenden sind an diesem Ort weitere Infiltrationsorgane geplant, deren Lage in der Übersichtskarte grün markiert ist. Ab März 1990 wurde an diesem Standort mit der Infiltration begonnen, wobei das Sickerbecken erst im Juni in Betrieb genommen wurde.

Die Infiltrationsanlage Lorscher Wald befindet sich, wie der Name bereits sagt, im Lorscher Wald, der östlich der Stadt Lorsch und westlich der Stadt Bürstadt liegt. Dieser Standort ist der jüngste, er wurde im November 2016 in Betrieb genommen und setzt sich aus fünf Infiltrationsorganen, die jeweils aus drei Schluckbrunnen, und dem ehemaligen Entwässerungsgraben „Farrenwiesengraben“ zusammen. In dem Übersichtsplan A.1 sind die Infiltrationsorgane inklusive der im Abstrom der Organe liegenden Entnahmebrunnen des Wasserbeschaffungsverbandes Riedgruppe Ost am südlichen Rand der Karte dargestellt. Da die für die Modellierung ausgewählten Infiltrationsorgane in den anderen beiden Standorten liegen, werden die Standorte Eschollbrücken/Pfungstadt und Lorscher Wald nicht weiter betrachtet.

---

## 6 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen

---

Zur Fragestellung der Funktionsweise der Infiltrationsorgane und im speziellen der einflussnehmenden Parameter, wurden vom Ingenieurbüro BGS UMWELT sowie vom Wasserverband Hessisches Ried bereits einige Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse im folgenden Abschnitt kurz erläutert werden.

### 6.1 Langzeitversuche an Grundwasseranreicherungsanlagen

Wie auch andere bautechnische Anlagen unterliegen Infiltrationsorgane Alterungserscheinungen, welche über Wochen oder Jahre zu einer Leistungsverminderung in Form von Kolmation führen. Der Aufwand für eine Regenerierung der betroffenen Organe variiert dabei bedingt durch die jeweilige Ausführung der Anlage. Zur Untersuchung und Analyse der Prozesse und Faktoren, die die Kolmation bedingen, wurden im Hessischen Ried durch den Wasserverband Hessisches Ried an verschiedenen Grundwasseranreicherungsanlagen In-situ-Langzeitversuche durchgeführt und deren Ergebnisse in einem Artikel für das Fachmagazin für Brunnen und Leitungsbau bbr zusammengefasst.

Zum Schutz vor möglichen Verunreinigungen in Form von mobilisierten Ablagerungen aus den Zuleitungen zu den Infiltrationsorganen ist in den Kiesbohrlöchern oberhalb der Kiesverfüllung eine 20 cm mächtige Filtersandschicht aufgebracht. Eine Kiesbohrlochgruppe von fünf bzw. sieben Bohrlöchern weist rechnerisch die gleiche Leistungsfähigkeit auf wie ein Sickerschlitgrab, jedoch weisen sie bereits nach wenigen Betriebsjahren bei hoher Beaufschlagung deutliche Rückgänge der Infiltrationsleistung auf, welche beim Betrieb eines Sickerschlitgrabens mit gleicher Nennleistung nicht festgestellt werden können. Zur Wiederherstellung der Infiltrationsleistung sind Regenerierungsmaßnahmen notwendig, welche in Form des maschinellen Austauschs der Filtersandschicht erfolgen. Bei hohen Infiltrationsmengen erfolgt dieser Austausch zwei- bis dreimal pro Jahr, wobei sich die Regenerierungskosten für den Anlagentyp Kiesbohrloch insgesamt auf 60.000 bis 180.000 Euro pro Jahr belaufen. (MIKAT & WEBER, 2011b, S. 40)

Zur Ermittlung der für die Kolmation relevanten Parameter wurde im Jahr 2008 ein Langzeitversuch an bestimmten Infiltrationsorganen unterschiedlicher Bauart durchgeführt. Teil der Untersuchungen waren dabei die Bestimmung der das Infiltrationsvermögen beeinflussenden hydraulischen Kennwerte, der Einfluss möglicher Inkrustationen in den Transportleitungen sowie die Analyse chemischer, physikalischer und mikrobiologischer Parameter, der Einfluss des zugeführten Infiltrationswassers und des kolmatierten Materials. An einer Anlage wurden die vorhandenen Kiesbohrlöcher zu Schluckbrunnen ausgebaut, wobei in zwei dieser vier Brunnen Glaskugeln anstelle von Kies als Filtermaterial eingesetzt wurde. (MIKAT & WEBER, 2011b, S. 41)

Bedingt durch die Bauart der Kiesbohrlöcher weisen diese eine geringere Filteroberfläche auf, mit der es bei gleicher Infiltrationsleistung zu deutlich höheren Fließgeschwindigkeiten kommt als bei Sickerschlitgräben. Bei Maximallast werden Geschwindigkeiten von 8 m/h in den Bohrlöchern und 1,3 m/h in den Sickerschlitgräben erreicht, im Durchschnitt etwa 3 m/h bzw. 0,5 m/h. Nach der erneuten Inbetriebnahme eines regenerierten Kiesbohrlochs bleibt die Infiltrationsleistung über einen längeren Zeitraum konstant hoch. Erste Kolmationserscheinungen in Form von dunkelbraunen Ablagerungen an der Oberfläche der Filtersandschicht sind nach etwa sechs Monaten zu erkennen. Eine Untersuchung der Filtersandschicht ergab, dass sich die abgelagerten Feststoffe auf die oberen zwei Zentimeter begrenzen. Eine chemische Untersuchung während der Kolmationsphase ergab eine Massenzunahme der abgesetzten Bestandteile Eisen, TOC, Aluminium, Silizium und Calcium, wobei diese Zunahme mit der gleichzeitigen Abnahme der Filtergeschwindigkeit korreliert. Im Vergleich verschiedener Infiltrationsorgane zeigte sich jedoch, dass die Gesamtmasse der abgesetzten Feststoffe nicht vom Infiltrationsvolumen abhängig ist. Nach einer Beschickung von 20.000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> bis 30.000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> sind an den Kiesbohrlöchern erste Kolmationserscheinungen zu beobachten. Bei

---

Sickerschlitzgräben am gleichen Standort konnten jedoch auch bei mehr als 55.000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> keine Hinweise auf eine Kolmation gefunden werden. (MIKAT & WEBER, 2011b, S. 42)

Im Zuge der Langzeitversuche wurde auch das Filtermaterial näher untersucht, welches eluierbare organische Verbindungen (TOC, DOC) und anorganische Stoffe (bspw. Eisen-(II) und Phosphat) enthielt, die wiederum als Substrat für Mikroorganismen dienen können. Fünf Kiese verschiedener Lagerstätten wurden auf eluierbare Verunreinigungen untersucht, wobei teilweise hohe Anteile dieser Verunreinigungen festgestellt wurden. Diese Anteile können zwar durch eine vorgeschaltete Kieswäsche verringert werden, jedoch wies ein anderer Kies bereits im ungewaschenen Zustand geringere Anteile auf, sodass in Folge der Regenerierungsmaßnahmen die verwendeten Kiese und Sande durch besser geeignetes Material ersetzt wurden. Zusätzlich dazu wird die Infiltrationsleistung auch durch Unterkorn und Abrieb beeinflusst, sodass zur Reduzierung von Feinanteilen das Filtermaterial vor dem Einbau gewaschen wird. (MIKAT & WEBER, 2011b, S. 42f.)

Der Zulauf des Infiltrationswassers erfolgt in den Kiesbohrlöchern über ein geschlitztes Kunststoffrohr oberhalb der Filtersandschicht, wodurch durch den freien Fall eine Zunahme des Sauerstoffgehalts im Wasser erfolgt. Dadurch bilden sich feine Gasblasen in der Filtersandschicht, die das Porenvolumen verringern. Es zeigte sich jedoch, dass in den Bereichen mit turbulenter Strömung keine Ablagerungen von Feststoffen vorhanden waren, sodass die Einlaufcharakteristik verändert wurde und ein perforiertes Kunststoffrohr, eine sogenannte Einlaufschnecke, eingebaut wurde. Abweichend von den Erwartungen trat aber die Kolmation unabhängig von der Zuführungsart des Wassers im gleichen Zeitrahmen ein. (MIKAT & WEBER, 2011b, S. 43f.)

Durch einen dauerhaften Infiltrationsbetrieb vermindern sich die mittleren Flurabstände im nahen Umfeld der Organe. Die dadurch hervorgerufene Verringerung des hydraulischen Gradienten zwischen dem Infiltrationsorgan und der ungespannten Grundwasseroberfläche hat eine Reduzierung der Infiltrationsleistung zur Folge. Durch eine Erhöhung des Einstaus im Kiesbohrloch kann diese Reduzierung ausgeglichen werden, jedoch beschränkt durch die von der Baumsetzung vorherrschenden Möglichkeiten. Die aufgrund des geringeren hydraulischen Gradienten reduzierte Infiltrationsleistung wird in den Sommermonaten durch die geringere Viskosität infolge der höheren Wassertemperatur kompensiert. Das Gegenteil ist dabei während der Wintermonate der Fall, wobei die Leistung aufgrund der höheren Viskosität um bis zu 40 % verringert wird. Die Temperaturen des Infiltrationswassers schwanken von maximal 28 °C im Sommer und minimal 5 °C im Winter. (MIKAT & WEBER, 2011b, S. 44)

Im Hinblick auf die Infiltrationsversuche konnte abschließend festgestellt werden, dass die Kolmation in den Kiesbohrlöchern von vielfältigen Parametern abhängig ist und beeinflusst wird. Kritische Filtergeschwindigkeiten dürfen nicht überschritten werden, damit es nicht zu einer Verlagerung von Unterkorn in die Porenräume kommt und dadurch der Prozess der Kolmation verstärkt wird. Dabei können Filtermaterial mit enger Korngrößenverteilung und die Verwendung von Glaskugeln diese Verlagerung verringern. Jedoch müssen neben den hydraulischen Aspekten auch die eluierbaren Verunreinigungen in Bezug auf die Kolmation berücksichtigt werden. Dies zeigen die größeren Regenerierungsintervalle, die aufgrund des Austauschs des Filtermaterials erreicht wurden. Gekoppelt mit einem optimierten Austausch der oberen Sandschichten konnten die Instandhaltungskosten jährlich um etwa 30 % gesenkt werden. (MIKAT & WEBER, 2011b, S. 45)

## **6.2 Analyse des Kolmationsvorgangs**

Anfang 2013 wurde von BGS UMWELT durch eine numerische Grundwassermodellierung eine Analyse des Kolmationsvorganges an den Infiltrationsorganen durchgeführt. Modellierungsobjekt waren dabei das Kiesbohrloch C des Organs 8 im Jägersburger Wald und der Sickerschlitzgraben (Organ 2) im Gernsheimer Wald. Da die Strömung innerhalb der Infiltrationsorgane untersucht werden sollte, wurde jeweils ein Modell erstellt, welches das Organ bzw. im Fall des Kiesbohrlochs einen Teil des

---

Organs und das jeweilige nähere Umfeld beinhaltet. Das weitere Umfeld wurde hierbei nicht berücksichtigt. Es wurde ein gekoppelter Vorgang von der Strömung innerhalb der Organe und außerhalb im anstehenden Aquifer betrachtet. Der Vorgang der Kolmation wurde durch eine schrittweise Verringerung des  $k_f$ -Wertes der Filtersandschicht in den Organen umgesetzt.

Beide Modelle wurden mit Daten aus Infiltrationsversuchen kalibriert, die am Sickerschlitzen und am Kiesbohrloch 8C durchgeführt wurden. Bei der Betrachtung des einzelnen Kiesbohrlochs ergab sich für einen  $k_f$ -Wert des Filtersandes von  $7 \cdot 10^{-3}$  m/s eine durchgehend gesättigte Strömung im Inneren. Wird dieser Wert jedoch verringert, so wie es durch eine Kolmation geschehen würde, ändern sich die Strömungsverhältnisse innerhalb des Bohrlochs. Bereits bei einem Wert von  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s kommt es zu einer Ablösung der Strömung zwischen der Filtersandschicht und der Strömung im Bohrloch. Wird dieser Wert nochmals um  $0,5 \cdot 10^{-3}$  m/s verringert sind beide Strömungen hydraulisch komplett voneinander entkoppelt und die Infiltrationsleistung des Kiesbohrlochs wird nur noch durch die Durchströmung der Filtersandschicht definiert. Dabei entsteht eine ungesättigte Zone innerhalb des Organs unterhalb der Filtersandschicht. (BGS UMWELT, 2013, S. 6ff.)

Die ebenfalls zur Infiltration eingesetzten Sickerschlitzen weisen eine deutlich geringere bis gar keine Anfälligkeit gegenüber Alterungserscheinungen auf. Der Unterschied dieser Bauform liegt in dem deutlich größeren Volumen des Kieskörpers, sodass bei der Durchströmung im Inneren des Infiltrationsorgans niedrigere Geschwindigkeiten auftreten. Zusätzlich liegt eine deutlich größere Eintrittsfläche für das Infiltrationswasser in die Filtersandschicht vor. Das Wasser versickert bereits auf den ersten Metern des Grabens, es bildet sich kein Überstau über die gesamte Länge des Grabens. Sofern eine Kolmation auf diesen ersten Metern auftritt, kann das Wasser sich weiter ausbreiten und bei einer weiter entfernten Stelle infiltrieren, ohne dass die Leistungsfähigkeit des Organs signifikant abnimmt. (BGS UMWELT, 2013, S. 11.)

Es wird davon ausgegangen, dass die beobachtete Kolmation an den Kiesbohrlöchern vorwiegend mikrobiologisch verursacht ist. Auch wenn das Infiltrationswasser nur sehr geringe Gehalte an Eisen aufweist, resultieren durch die hohe Infiltrationsmenge und die hohe Fließgeschwindigkeiten Frachten, die für eine biologische Kolmation ausreichend sind. Durch eine vergleichende Analyse der Fließgeschwindigkeiten im Kiesbohrloch und im Sickerschlitzen, welche durch eine numerische Berechnung ermittelt wurden, wurde nach Hinweisen auf eine mögliche Ertüchtigung vorhandener Organe oder eine konstruktive Verbesserung neuer Organe gesucht. Das Ergebnis zeigt dabei, dass bei einer Beschickung des Kiesbohrlochs von 25 m<sup>3</sup>/h die Filtergeschwindigkeiten von der Filtersandschicht (13 - 14 m/h) bis zur Sohle (1 - 2 m/h) abnehmen. Jedoch belief sich die Beaufschlagung einer 5er Kiesbohrlochgruppe in der Infiltrationspraxis auf 38 m<sup>3</sup>/h und damit etwa 7,6 m<sup>3</sup>/h. Mit diesem Wert ergeben sich die Filtergeschwindigkeiten von 4,3 m/h im oberen Bereich bis 0,4 m/h im Bereich der Sohle des Bohrlochs. Demnach sei davon auszugehen, dass bereits Geschwindigkeiten von 3 - 4 m/h im oberen Bereich des Kiesbohrlochs zu einer Kolmation führen. Allerdings sei ebenso die tatsächliche Fließgeschwindigkeit, die Bahngeschwindigkeit, ein Indikator für eine mögliche Kolmationsgefahr. Jedoch kann diese in der Regel nicht erfasst werden, sodass mit der Abstandsgeschwindigkeit eine an die Bahngeschwindigkeit annähernde Größe berechnet werden kann. Für die Filtersandschicht ergeben sich deutlich größere Abstandsgeschwindigkeiten (75 m/h) als für die Kiesverfüllung (50 m/h) des Bohrlochs. (BGS UMWELT, 2013, S. 11ff.)

Für den Sickerschlitzen im Gernsheimer Wald (Infiltrationsorgan 2) wurde ebenfalls ein dreidimensionales Finite-Element-Modell erstellt, welches mit den Werten aus einem Infiltrationsversuch kalibriert wurde. Der Sickerschlitzen weist im Modell ausschließlich eine Kiesverfüllung auf und verfügt nicht über eine Filtersandschicht. Aus der Kalibrierung ergeben sich  $k_f$ -Werte  $3 \cdot 10^{-2}$  m/s für die Kiesverfüllung und  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s für das Anstehende. Bei der Berechnung mit einer Infiltrationsmenge von 111 m<sup>3</sup>/h ergaben sich drei charakteristische Zonen: Im ersten Drittel verläuft die Strömung vorwiegend vertikal nach unten gerichtet und nur in diesem Bereich gibt es einen Überstau, im zweiten Drittel erfolgt ein Längstransport des Infiltrationswassers und im letzten

---

Drittel werden die Geschwindigkeiten abgemindert und es liegt ein fließender Übergang in das Anstehende vor. Im ersten Drittel liegen Filtergeschwindigkeiten von 0,4 - 3,0 m/h vor, welche geringer sind als jene im zweiten Drittel mit 2,5 – 4,0 m/h. Im letzten Drittel sind die Geschwindigkeiten wieder geringer und liegen im Bereich der des ersten Drittels mit 0,4 – 2,5 m/h. Bei der Betrachtung der durchschnittlichen im Betrieb erreichten Infiltrationsmenge von 38 m<sup>3</sup>/h ergab sich aus der Modellrechnung in keinem Bereich des Sickerschlitgrabens ein Überstau. Die Filtergeschwindigkeiten im ersten Drittel reduzieren sich leicht zu 0,2 – 2,0 m/h, im zweiten und dritten Drittel bleiben sie jedoch zum großen Teil gleich mit 2,2 – 4,0 m/h bzw. 0,4 – 2,5 m/h. Dies wird mit dem sich „von selbst“ einstellenden geringeren Fließquerschnitt bei niedrigerer Infiltrationsleistung erklärt. Die Abstandsgeschwindigkeit im Sickergraben wurde zu 8,3 – 13,3 m/h berechnet. (BGS UMWELT, 2013, S. 14ff.)

Der Betrieb zeigt, dass Filtergeschwindigkeiten von 2,5 – 4,0 m/h und Abstandsgeschwindigkeiten von 8,3 – 13,3 m/h bisher keine Tendenz einer Leistungsminderung des Sickerschlitgrabens gezeigt haben. Dabei steigen auch bei einer Erhöhung der Infiltrationsmenge die Filtergeschwindigkeiten kaum an. An den Kiesbohrlöchern führen bereits Filtergeschwindigkeiten von etwa 4,3 m/h und Abstandsgeschwindigkeiten von 21,5 m/h zu einer Kolmation. Bei einer Erhöhung der Infiltrationsmenge steigen die Geschwindigkeiten dabei deutlich an, da im Gegensatz zum Sickerschlitgrabens der Durchflussquerschnitt unveränderlich ist. Nimmt man nun die maßgeblichen Geschwindigkeiten des Sickerschlitgrabens als konstruktive Auslegungsgröße für Ertüchtigungsmaßnahmen oder zur Dimensionierung neuer Infiltrationsorgane, dürfe eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 13 m/h und eine maximale Filtergeschwindigkeit von 4 m/h nicht überschritten werden. Des Weiteren solle die Filtergeschwindigkeit beim Übergang in das Anstehende im Bereich von etwa 1 – 2 m/h liegen. (BGS UMWELT, 2013, S. 23)

Die Modellierung durch BGS UMWELT mit dem Ziel der Analyse des Kolmationsvorgangs an den Kiesbohrlöchern, mit Fokus auf eine veränderte Durchlässigkeit des Filtersandes und auf die Infiltrationsgeschwindigkeit des Wassers, zeigte, dass bereits ab einer kleinen Verringerung des  $k_f$ -Wertes durch die Kolmation die Strömung im Kiesbohrloch abreißt und dadurch zwei voneinander entkoppelte Systeme entstehen. Dadurch ist die Infiltrationsleistung nur noch durch die Durchströmung der Filtersandschicht bestimmt. Aufgrund der deutlich größeren Versickerungsoberfläche am Sickerschlitgrabens kann bei einer möglichen Kolmation im Einlaufbereich das Wasser auf andere Bereiche ohne Kolmation ausweichen, wodurch die Infiltrationsleistung im Großteil konstant bleibt. Auch die Geschwindigkeiten, die bei der Infiltration des Wassers resultieren, spielen eine Rolle bei dem Kolmationsvorgang im Hinblick auf die dadurch resultierenden Frachten und liegen an den Bohrlöchern aufgrund der geringeren Eintrittsfläche deutlich höher als beim Sickerschlitgrabens.



## 7 Modellierung der Kiesbohrlochgruppe 6 im Jägersburger Wald

Aufgabe ist es, ein hochaufgelöstes dreidimensionales Nahbereichsmodell für einen Sickerschlitzen und für ein Kiesbohrloch zu erstellen. Zur Modellierung wird das Programm Spring von der delta h Ingenieurgesellschaft mbH verwendet, mit dem Grundwasserströmungen, Stofftransport und Wärmetransport modelliert werden können. Mit diesem Programm werden zwei Finite-Element-Modelle neu erstellt, um die gekoppelte Innen- und Außenströmung eines Kiesbohrlochs und eines Sickerschlitzen, die vorhandenen lokalen Geschwindigkeiten sowie die Wechselwirkung mit anderen Infiltrationsorganen zu untersuchen und damit im Allgemeinen die maßgebenden grundwasserhydraulischen Parameter für die Infiltrationsleistung identifizieren zu können. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte der Modellerstellung für ein Kiesbohrloch näher erläutert sowie die Untersuchung der grundwasserhydraulischen Parameter dokumentiert.

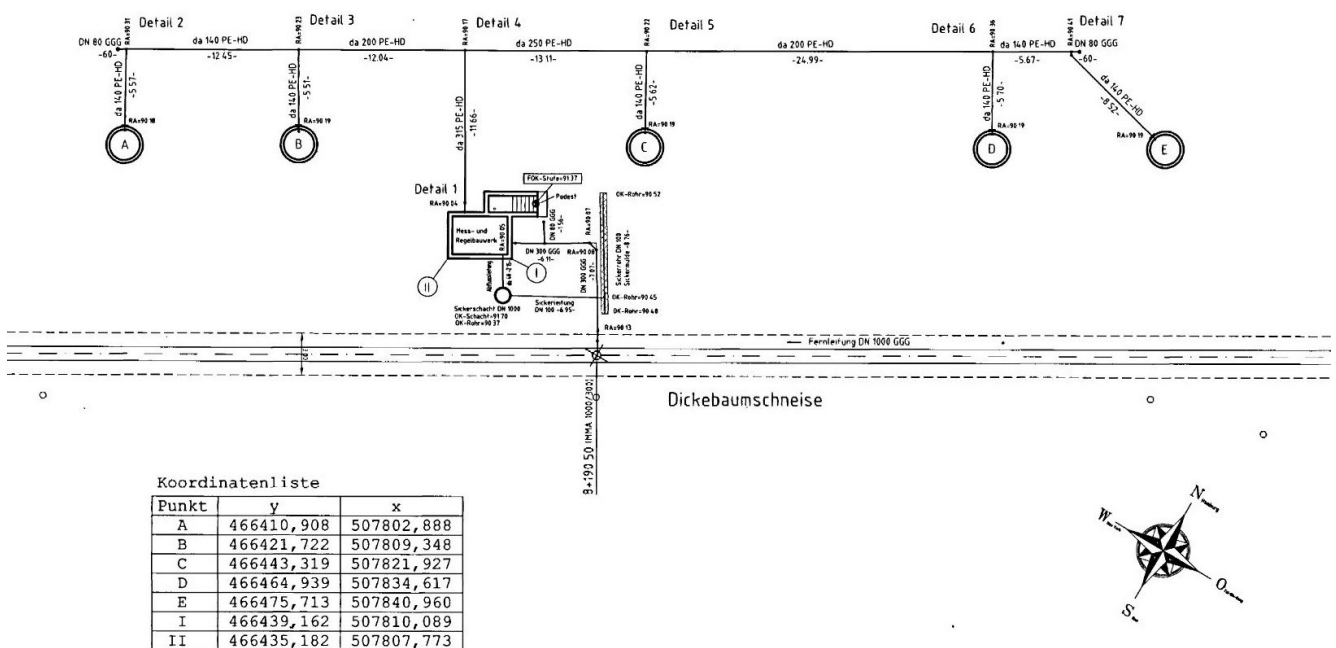


Abbildung 7-1: Lageplan des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald

Für das Modell des Kiesbohrlochs wird die Kiesbohrlochgruppe 6 im Jägersburger Wald gewählt, da an diesem Organ durch verschiedene Messeinrichtungen eine für die Modellierung notwendige Datengrundlage vorhanden ist. Die Bauform der Kiesbohrlochgruppe, bestehend aus fünf bzw. sieben einzelnen Kiesbohrlöchern, wird auch als aufgelöste Bauform bezeichnet. Sie wurde entwickelt, um den Eingriff in das Landschaftsbild im Vergleich mit einem Sickerschlitzen zu verringern, jedoch bei rechnerisch gleicher Infiltrationsleistung. In Anlage C ist eine Fotodokumentation des Infiltrationsorgans 6 hinterlegt, in der das Mess- und Regelbauwerk des Organs abgebildet ist sowie der sichtbare Teil des Schachtbauwerks oberhalb des Geländes und der Innenbereich eines einzelnen Kiesbohrlochs. Mit Abbildung 7-1 sind der Lageplan und damit die genaue Anordnung der fünf Kiesbohrlöcher des Organs 6 gegeben. Die Bezeichnung der einzelnen Kiesbohrlöcher erfolgt dabei mit den Buchstaben A – E. In Anlage C ist ein Plan der Kopfausbildung der Kiesbohrlöcher im Jägersburger Wald hinterlegt. Die fünf Bohrlöcher mit einem Bohrdurchmesser von 1,5 m liegen parallel zur Dickebaumschneise im Jägersburger Wald. Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Bohrlöcher A und B sowie D und E liegt bei etwa 12,5 m. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten von B und C bzw. C und D ist hingegen doppelt so groß mit 25 m. Diese Abstände wurden gewählt, um trotz der gegenseitigen Beeinflussung während der Infiltration etwa gleichgroße Wassermengen pro

Kiesbohrloch zu infiltrieren und damit eine gleichmäßige Beschickung gewährleisten zu können. Die Oberkante des Schachtdeckels liegt etwa 60 cm oberhalb der Geländeoberkante.

Zu Beginn der Infiltration über die Kiesbohrlöcher war zunächst eine 10 cm mächtige Filterkiesschicht vorhanden, gefolgt von einer 20 cm mächtigen Filtersandschicht und anschließend die Filterkiesverfüllung bis zur Endteufe. Die unterschiedlichen Schichten waren mit einem Vlies voneinander abgetrennt. Dieser Ausbau führte jedoch zu einer vergleichsweise raschen Kolmation, da sich in dem Vlies Mikroorganismen ansiedelten, die die bei der Herstellung des Vlieses verwendeten Tenside für ihren Stoffwechsel verwerteten. Daher wurden die Vliese entfernt und nicht weiter verwendet sowie die Schichtabfolge innerhalb des Kiesbohrlochs verändert, sodass die etwa 7 m mächtige Kiesverfüllung nur noch von einer 20 cm mächtigen Filtersandschicht abgedeckt ist. Innerhalb der Kiesbohrlöcher sind drei Rammfilterlanzen eingebracht, deren Filterstrecke von 0,5 m in unterschiedlichen Tiefen liegt, wodurch die Druckverhältnisse innerhalb des Kiesbohrlochs aufgezeichnet werden können. Im Folgenden wird als mittlere Rammfilterlanze diejenige bezeichnet, die auf mittlerer Höhe im Kiesbohrloch ihre Filterstrecke hat.

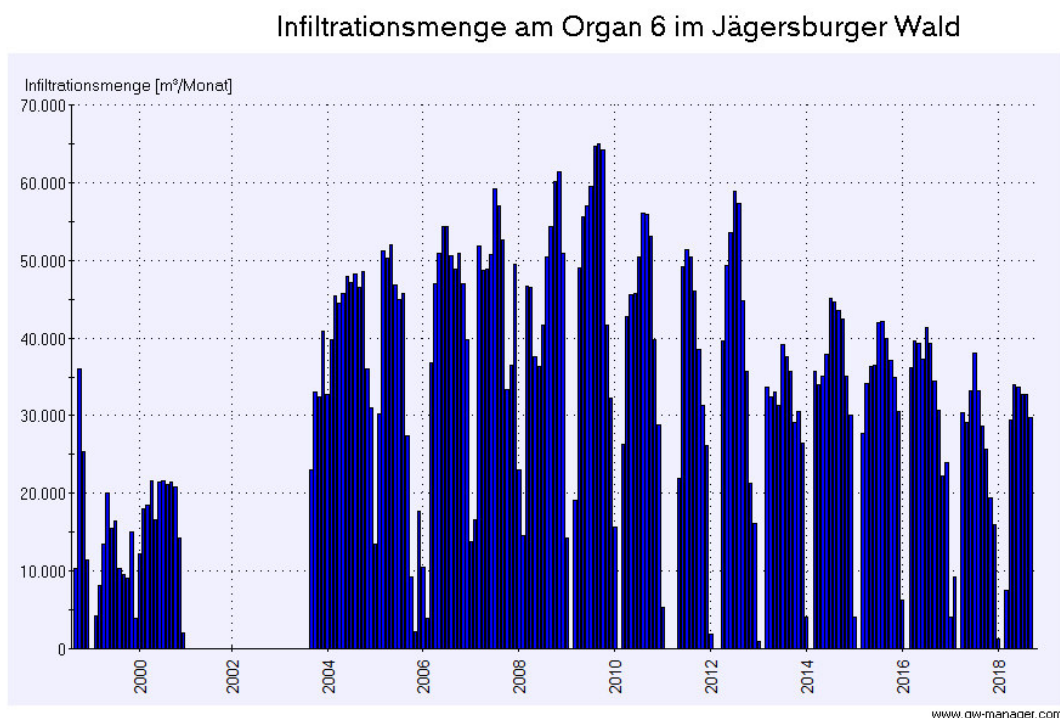


Abbildung 7-2: Infiltrationsmenge am Organ 6 im Jägersburger Wald von 1998 bis 2018

Die obenstehende Abbildung 7-2 zeigt die Infiltrationsmenge pro Monat am Organ 6 im Jägersburger Wald, wobei im Oktober 1998 mit der Infiltration begonnen wurde. Aufgrund der Nassperiode Anfang der 2000er Jahre wurde die Infiltration eingestellt, um keine zusätzlichen Vernässungsschäden zu verursachen. Erst im September 2003 wurde die Infiltration wieder aufgenommen. In der Abbildung zu erkennen ist ebenfalls die durch die Revision des Wasserwerks Biebesheim bedingte Infiltrationspause jeweils Anfang des Jahres. Ausgenommen des etwa zweieinhalb jährigen Infiltrationsstopps liegt die mittlere Infiltrationsmenge bei etwa 32.000 m<sup>3</sup>/Monat, was etwa 44 m<sup>3</sup>/h entspricht bzw. etwa 9 m<sup>3</sup>/h pro Bohrloch. Die maximale Infiltrationsmenge mit etwa 65.000 m<sup>3</sup>/Monat wurde im September 2009 erreicht.

Die Steuerung der Infiltrationsmenge wird in erster Linie über die Überstauhöhe geregelt. Es wird versucht, in allen Kiesbohrlöchern etwa einen gleichen Überstauwert zu erreichen, wonach sich dann die Infiltrationsmenge pro Bohrloch einstellt. Die Überprüfung der Überstauhöhe erfolgt dabei manuell. Jedes Infiltrationsorgan im Jägersburger Wald wurde für eine maximale Infiltrationsleistung von 125 m<sup>3</sup>/h konzipiert, was einer Menge von 25 m<sup>3</sup>/h pro Kiesbohrloch entspricht.

Für die Bearbeitung der vorliegenden Fragestellung ist die Verwendung eines stationären Modells ausreichend. Durch die systematische Änderung verschiedener Parameter, wie beispielsweise des Grundwasserstandes oder des  $k_f$ -Wertes, können verschiedene Szenarien erzeugt, dokumentiert und bewertet werden.

## 7.1 Datenaufbereitung

Das vorherrschende Klima im Hessischen Ried führt in den Sommermonaten wegen der hohen potentiellen Verdunstung im langjährigen Mittel zu einer negativen klimatischen Wasserbilanz (Mikat; Weber, 2011a. S. 44f.). Die Grundwasserneubildung beläuft sich in Trockenjahren auf wenige mm/a und kann gebietsweise auch vollständig erliegen, während in Nassjahren mehrere 100 mm/a erreicht werden können. Im Bereich des Jägersburger Waldes befindet sich die Lysimeterstation Jägersburg, für die langjährige Niederschlags- und Sickerwassermessungen vorhanden sind. Die Boden- und Vegetationsverhältnisse in diesem Bereich werden als „extensiv genutztes Ackerland mit wechselnder Nutzung auf lehmigem Sand und typischen Gley mit Rheinweiß“ charakterisiert (Wasserverband Hessisches Ried, 2005, S. 16). In Tabelle 7-1 sind die durchschnittlichen Werte der Niederschlags- und Sickerwasserhöhen für die Wasserwirtschaftsjahre 1967 bis 2004 aufgelistet, wobei diese zusätzlich auf die Winter- und Sommermonate aufgeteilt sind. Für den gesamten Zeitraum ergab sich ein mittlerer Wert von 591 mm für den Niederschlag und 119 mm für das Sickerwasser pro Jahr. Im Durchschnitt liegt die Niederschlagshöhe für das Winterhalbjahr bei 241 mm und die Sickerwasserhöhe bei 90 mm, was etwa 37 % des Niederschlags entspricht. Mit einer Höhe von 29 mm für das Sickerwasser bei einer Niederschlagshöhe von 350 mm liegt der Anteil des Sickerwassers für das Sommerhalbjahr bei etwa 8 %. Dieser Anteil ist deutlich geringer als im Winterhalbjahr, was auf die erhöhte Evaporation in den Sommermonaten zurückzuführen ist.

Tabelle 7-1: Durchschnittliche Niederschlags- und Sickerwasserwerte der Jahre 1967 - 2004

Zeitraum	Niederschlag	Sickerwasser	Anteil
	[mm]	[mm]	[%]
Winter (Nov. - April)	241	90	37,3
Sommer (Mai - Okt.)	350	29	8,3
Gesamt (Nov. - Okt.)	591	119	20,1

Vom Wasserverband Hessisches Ried liegen verschiedene Datensätze vor, die zur Kalibrierung des Modells verwendet werden können. Zu diesen Daten zählen Einzelmesswerte der Infiltrationsmengen an jedem Kiesbohrloch des Infiltrationsorgans 6 sowie Messungen des Überstaus in den Bohrlöchern und des Wasserstands in den Rammfilterlanzen. In Anlage E ist mit Tabelle E-2 eine Übersicht über die zur Verfügung stehenden Daten gegeben. Sofern Daten aus den Rammfilterlanzen vorhanden sind, wurden diese immer in der mittleren Rammfilterlanze erhoben, die in einer Tiefe von 6,5 – 7,0 m GOK verfiltert ist. Generell sind Daten aus den Jahren 2014 bis 2018 vorhanden, wobei jedoch nicht immer alle drei Parameterdaten aufgezeichnet wurden und der Zeitraum der Parametermessungen teilweise nicht deckungsgleich ist. So liegen beispielsweise für das Jahr 2014 Daten zum gemessenen Überstau in den einzelnen Kiesbohrlöchern von März bis einschließlich Dezember vor, die Daten der Infiltrationsmenge belaufen sich jedoch nur auf den Zeitraum Mai und Juni, Daten der Rammfilterlanzen sind für 2014 gar nicht vorhanden. Ebenso unterschiedlich ist die Dichte der Messungen: Die Daten für den Überstau und den Wasserstand in der Rammfilterlanze liegen für jede halbe Stunde vor, ab 2017 jedoch nur noch stündlich, die Infiltrationsmengen hingegen sind für 2014 als stündliche Werte und für die anderen Jahre halbstündlich, jedoch nicht zur vollen Stunde sondern um eine Viertelstunde verschoben, dokumentiert.

In Anlage E sind in Tabelle E-5 die minimale, maximale und mittlere Infiltrationsmenge der entsprechenden Datensätze für die einzelnen Kiesbohrlöcher aufgelistet. Bei allen Datensätzen liegt die minimale Infiltrationsmenge bei 0 m<sup>3</sup>/h. Die restlichen gemessenen Mengen der Datensätze liegen im

Bereich der mittleren Infiltrationsmengen des Organs 6. Zu erkennen ist in Tabelle E-5 ebenso, dass die beiden außen liegenden Bohrlöcher A und E geringere Infiltrationsmengen aufweisen als die innen liegenden Bohrlöcher. Dies verdeutlicht auch das folgende Diagramm, welches einen Ausschnitt der Datenreihe von 2014 zeigt, wobei zur besseren Übersichtlichkeit nur jeweils ein Wert pro Tag abgebildet ist und nicht die stündlichen Werte. Das Verhältnis der einzelnen Infiltrationsmengen zueinander ist dabei im Schnitt gleichbleibend, das heißt die Infiltrationsmenge von Kiesbohrloch E liegt etwa  $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$  unter der von Bohrloch A, welche etwa  $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$  unter der von Kiesbohrloch B liegt, die wiederum etwa  $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$  unter der Infiltrationsmenge von Bohrloch C liegt. Die Menge an den beiden Kiesbohrlöchern C und D sind annähernd gleich groß. Die Steuerung der Infiltration erfolgt dabei wie bereits beschrieben nur indirekt über die Infiltrationsmenge.

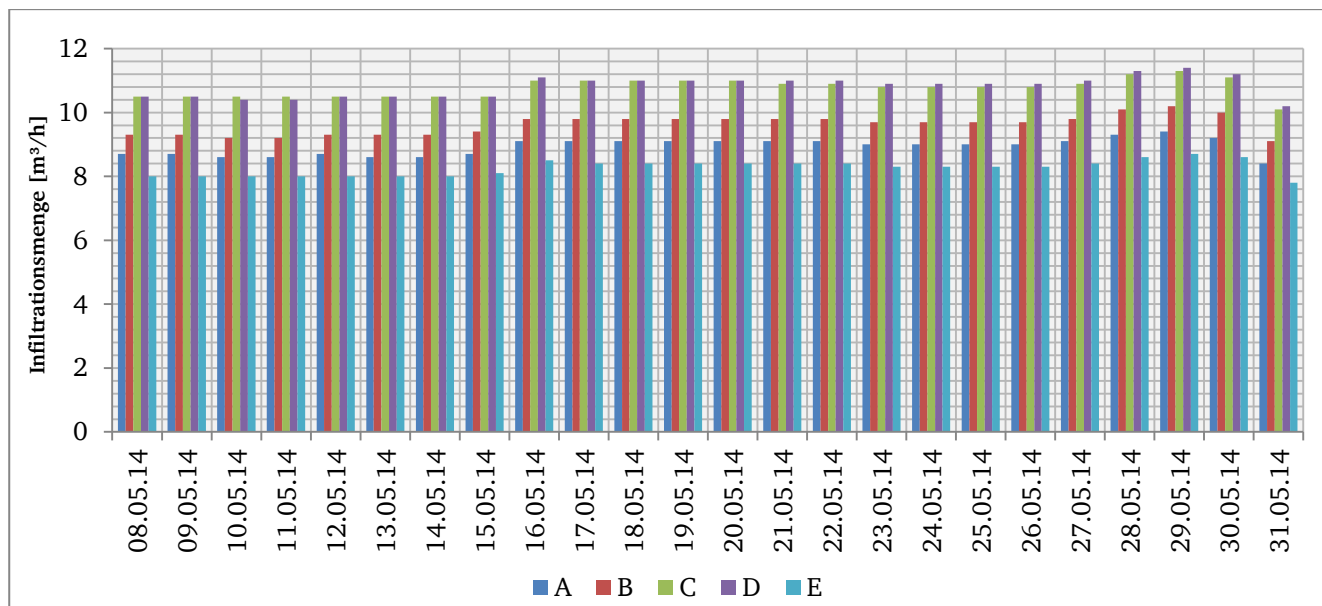


Abbildung 7-3: Infiltrationsmengen der Kiesbohrlöcher des Organs 6 im Jägersburger Wald im Mai 2014

In Abbildung 7-4 auf der folgenden Seite ist der gemessene Überstau in den einzelnen Kiesbohrlöchern des Infiltrationsorgans 6 für den gleichen Zeitraum aufgetragen wie in der oben stehenden Abbildung. Dabei ist zu erkennen, dass nicht alleine die Infiltrationsmenge des Kiesbohrlochs den Überstau in dem betroffenen Bohrloch beeinflusst: Trotz der etwa gleichen Infiltrationsmenge der beiden Kiesbohrlöcher C und D liegt der Überstau im Bohrloch C etwa 20 cm unter dem Wert des Überstaues in Bohrloch D. Eine Erklärung hierfür kann die Lage der einzelnen Kiesbohrlöcher sein und damit die gegenseitige Beeinflussung während der Infiltration. Der Abstand der Mittelpunkte von C zu B und D liegt bei 25 m, der Abstand zwischen D und E liegt jedoch nur bei 12,5 m. Dadurch kann die Infiltration am Bohrloch D von der Infiltration am Bohrloch E beeinflusst werden und in diesem Fall vermindert werden, was trotz eines um 20 cm höheren Überstaues zu einer etwa gleichen Infiltrationsmenge bei D im Vergleich zu C führt. Die Auswirkungen einer potentiellen gegenseitigen Beeinflussung kann man ebenso erkennen, wenn man die Infiltrationsmenge und den Überstau von Bohrloch A mit den Werten von Bohrloch E vergleicht. Am Bohrloch E wird über den gesamten Zeitraum die geringste Menge infiltriert, jedoch liegt hier der Überstau etwa 10 cm über dem Wert von Bohrloch A, in welchem aber etwa  $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$  mehr infiltriert wird. Jedoch wird am Bohrloch D im Durchschnitt  $1,1 \text{ m}^3/\text{h}$  mehr Wasser infiltriert als am Bohrloch B, sodass die Beeinflussung von D auf E größer zu sein scheint als die Beeinflussung von B auf A. Die Lage der Kiesbohrlöcher zueinander wurde jedoch so festgelegt, dass theoretisch bei gleicher Überstauhöhe, bezogen auf Normalnull, eine gleich große Infiltrationsmenge resultiert. Für die Berechnung wurde der Untergrund im näheren Umfeld der Organe als homogen betrachtet. Inhomogenitäten im Untergrund, wie bspw. Tonlinsen, können örtlich indes zu abweichenden Infiltrationsmengen führen. Zusätzlich nehmen auch andere Parameter Einfluss auf die Infiltrationsleistung, sodass alleine durch den Vergleich der beiden Diagramme ohne Berücksichtigung der weiteren Parameter die gegenseitige Beeinflussung nicht

unabhängig quantifiziert werden kann. Bei der systematischen Variation der grundwasserhydraulischen Parameter wird daher die gegenseitige Beeinflussung der Kiesbohrlöcher bei der Infiltration explizit untersucht, um genauere Aussagen über deren Einfluss auf die Infiltrationsleistung treffen zu können.

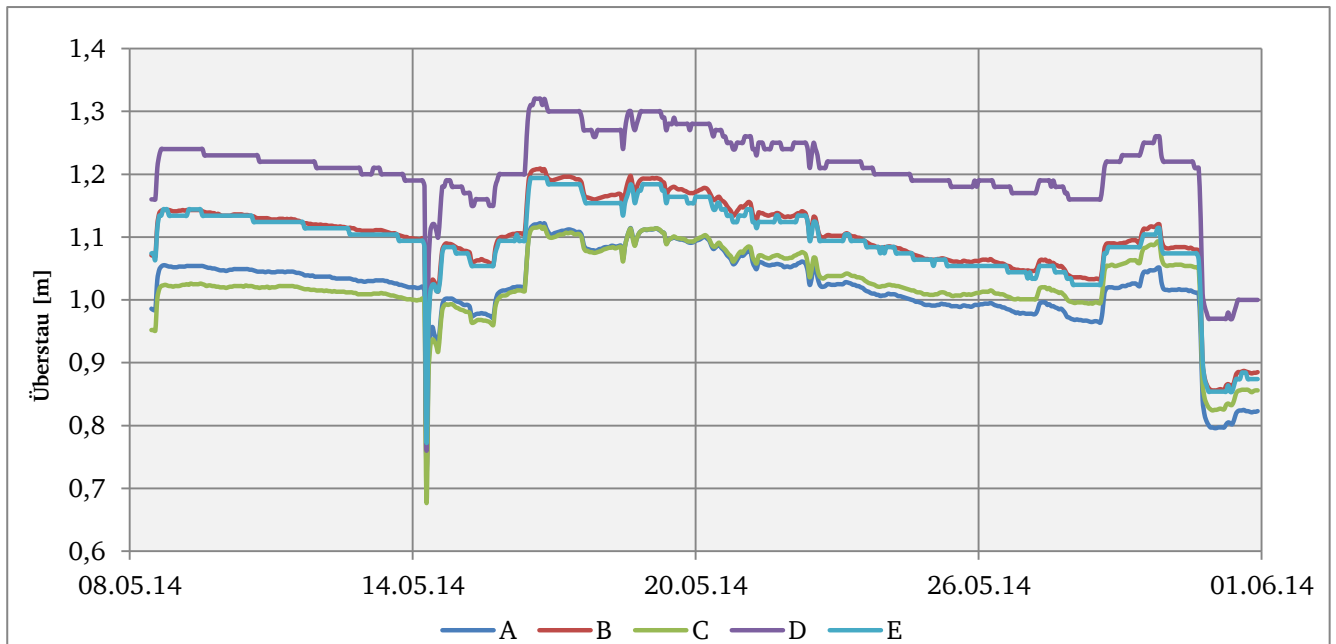


Abbildung 7-4: Gemessener Überstau in den Kiesbohrlöchern des Organs 6 im Jägersburger Wald im Mai 2014

In Anlage F sind in mehreren Diagrammen die Infiltrationsmenge, der gemessene Überstau als Wasserstand im Bohrloch oder der Wasserstand in der mittleren Rammfilterlanze, die Höhenlage des Beginns der Filtersandschicht und der Wasserstand der im Zustrom liegenden Landesmessstelle 544018 für einzelne Kiesbohrlöcher und für die unterschiedlichen Datensätze aufgetragen. Dabei ist, trotz der stündlich vorliegenden Werte, pro Tag nur ein Wert aufgetragen, um eine bessere Übersicht in den Diagrammen zu erhalten. An Tagen, an denen aus diversen Gründen die Infiltrationsmenge zeitweise deutlich geringer war oder sogar bei 0 m<sup>3</sup>/h lag, ist dies durch den Rückgang der Überstauhöhe bzw. des Wasserstandes in der mittleren Rammfilterlanze zu erkennen. In Abbildung 7-5 auf der folgenden Seite sind zusätzlich zu der Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 die Wasserstandsganglinien der Grundwassermessstellen 11 und 17 der Hessenwasser GmbH aufgetragen. Die Landesmessstelle liegt 750 m und die Messstelle 17 100 m von Organ 6 entfernt. Beide befinden sich im Zustrom zum Organ, liegen jedoch außerhalb des direkten Einflussbereiches der Infiltration. Die Messstelle 17 liegt im Abstrom etwa 550 m vom Organ entfernt. In Abbildung D-7 in Anlage D ist die Lage dieser und anderer Messstellen im Umfeld des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald aufgezeigt.

Im Diagramm ist zu erkennen, dass ab August 2016 die Infiltrationsmenge am Bohrloch E des Organs 6 abnimmt, obwohl der Überstau etwa auf dem gleichen Niveau bleibt. Dies kann ein Hinweis auf Kolmation im Kiesbohrloch sein, wodurch sich die Durchlässigkeit innerhalb des Bohrlochs verringert. Da der Grundwasserstand im Umkreis des Infiltrationsorgans im gleichen Zeitraum nicht signifikant ansteigt, teilweise sogar sinkt, ist eine Verringerung der Infiltrationsleistung infolge eines geringeren hydraulischen Gradienten auszuschließen. Im Vergleich mit den anderen Bohrlöchern des Organs 6 fällt jedoch auf, dass ab August 2016 bei allen Bohrlöchern die Infiltrationsmenge abnimmt, bei gleichbleibendem Überstau. Da dies an allen Kiesbohrlöchern gleichzeitig auftritt, ist eine Kolmation als Ursache unwahrscheinlich. Eine andere Erklärung könnte die Verringerung der Viskosität aufgrund der geringeren Temperaturen des Infiltrationswassers in den Wintermonaten sein. In welchem Maße sich die Viskosität auf die Infiltrationsleistung auswirken kann, wird anschließend in Kapitel 7.5 durch verschiedene Simulationen untersucht.



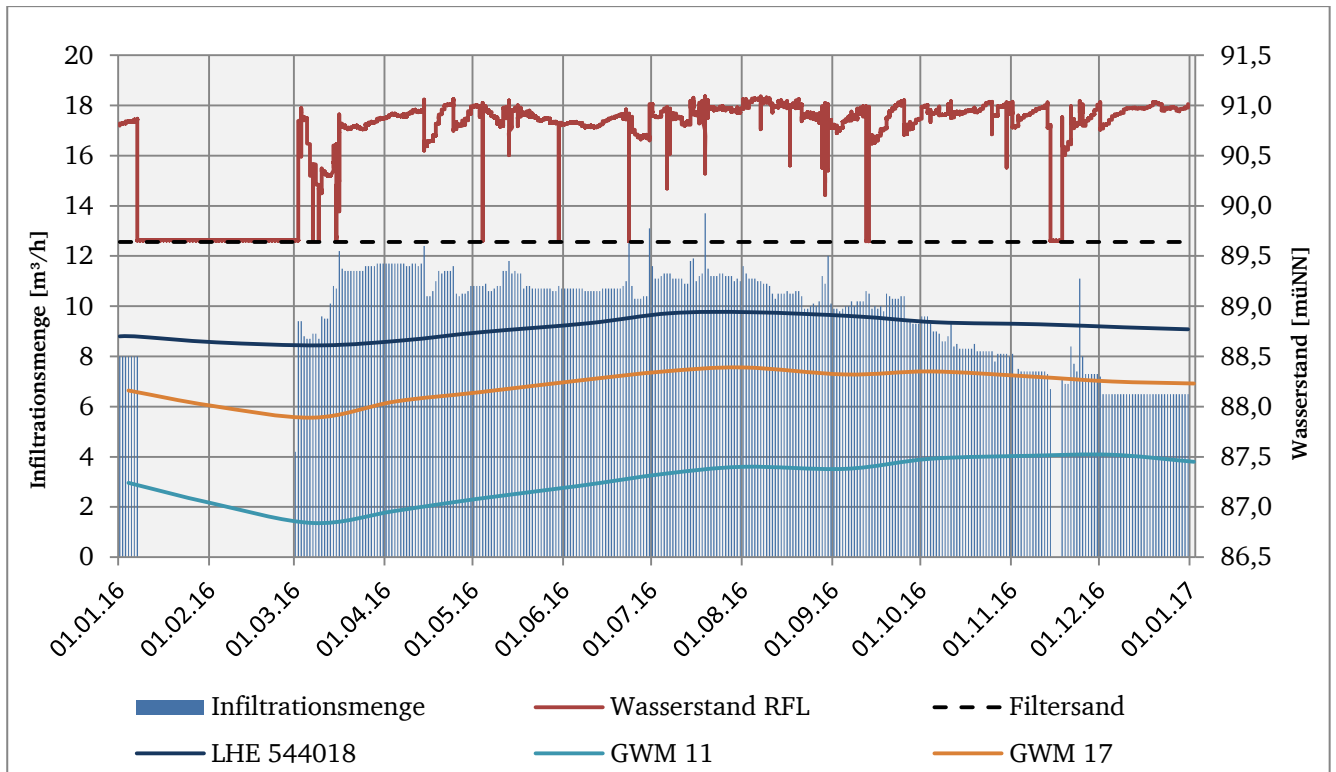


Abbildung 7-5: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch E, Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 sowie der Messstellen 11 und 17 von Januar bis Dezember 2016

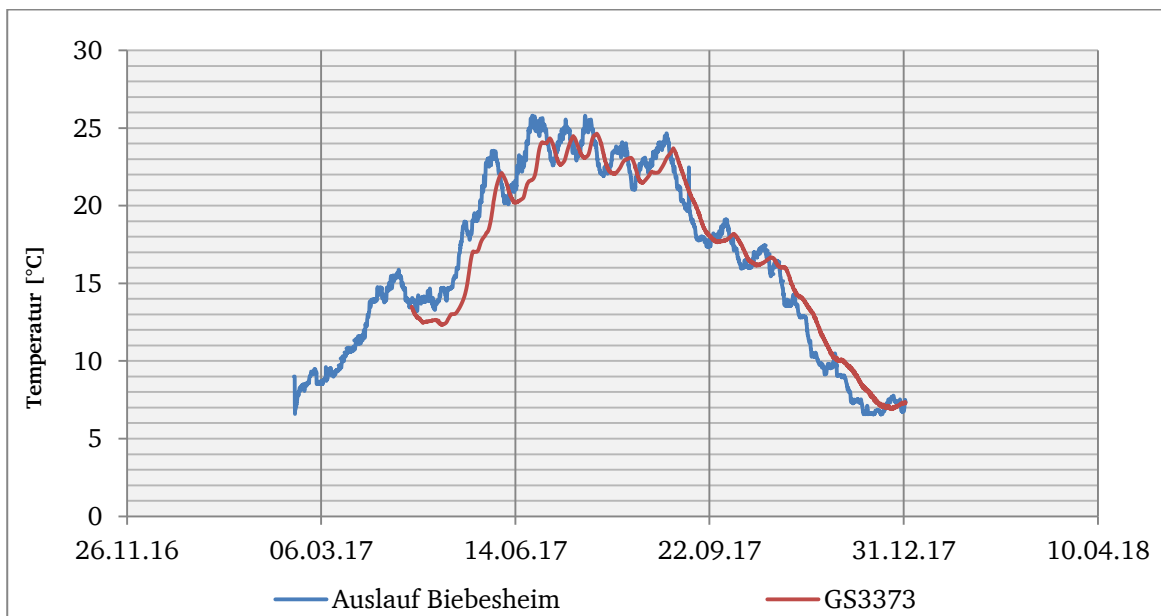


Abbildung 7-6: Temperaturverlauf des Infiltrationswassers und des angereicherten Grundwassers an der Grundwassermessstelle GS3373 im Einflussbereich des Organs 6 im Jägersburger Wald

Da das Wasser zur Infiltration aus dem Rhein entnommen wird, schwankt mit der Temperatur des Rheinwassers ebenso die Temperatur des Infiltrationswassers im Verlauf des Jahres. In Abbildung 7-6 ist der Verlauf der Temperatur des Infiltrationswassers von Ende Februar 2017 bis zum Jahresende aufgetragen, wobei die Werte am Auslauf der Wasseraufbereitung in Biebesheim gemessen wurden. Das Temperaturminimum liegt bei 6,6 °C und wurde im Februar und Dezember gemessen, das Maximum liegt bei 25,8 °C und wurde im Juni und Juli erreicht. Es ergibt sich dadurch eine Temperaturdifferenz von 19,2 °C. Im Diagramm ist ebenso von Ende April bis zum Jahresende der Temperaturverlauf des angereicherten Grundwassers, gemessen an der Grundwassermessstelle

GS3373, aufgetragen. Diese Messstelle befindet sich im direkten Umkreis des Infiltrationsorgans in einer Entfernung von etwa 6 m vom Kiesbohrloch A. Dabei ist der Einfluss der Temperatur des infiltrierten Wassers auf die Temperatur des angereicherten Grundwassers deutlich zu erkennen, jedoch aufgrund des Fließweges zeitlich verzögert und wegen der Vermischung mit dem Grundwasser leicht abgeschwächt.

Da für die Filtersandschicht sowie die Filterkiesschicht in den Kiesbohrlöchern keine Werte für den Durchlässigkeitsbeiwert vorliegen, werden diese Werte zunächst anhand der zur Verfügung stehenden Körnung nach Hazen berechnet. Dabei sind keine Angaben zum Verlauf der Kornsummenlinie gegeben, sodass als Wert für  $d_{10}$  der minimale und maximale Wert der Korndurchmesser verwendet werden, um den Bereich zu definieren, in dem der Durchlässigkeitsbeiwert liegen kann. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 7-2 aufgelistet. Der Filterkies weist eine Körnung von 2,0 – 3,15 mm auf, wodurch sich ein minimaler  $k_f$ -Wert von  $4,6 \cdot 10^{-2}$  m/s und ein maximaler Wert von  $1,2 \cdot 10^{-1}$  m/s ergeben. Für den Filtersand belaufen sich die Werte auf  $2,9 \cdot 10^{-3}$  m/s bzw.  $1,2 \cdot 10^{-2}$  m/s bei einer Körnung von 0,5 – 1,0 mm. Für die Modellierung des Infiltrationsorgans 6 werden vorerst die beiden minimalen Werte für den Durchlässigkeitsbeiwert angesetzt, welche bei der Kalibrierung des Modells überprüft und ggf. angepasst werden.

Tabelle 7-2 Durchlässigkeitsbeiwerte der Filterschichten im Kiesbohrloch

	Körnung	min. $k_f$ -Wert	max. $k_f$ -Wert
	[mm]	[m/s]	[m/s]
Filterkies	2,0 – 3,15	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
Filtersand	0,5 – 1,0	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$

## 7.2 Modellaufbau

Ziel der Modellierung ist die Identifizierung der maßgebenden grundwasserhydraulischen Parameter, die am Organ 6 im Jägersburger Wald ausschlaggebend sind und die Neigung zur Alterung an diesem Organ bestimmen. Beim Organ 6 handelt es sich um eine Kiesbohrlochgruppe mit fünf großkalibrigen Einzelbohrungen. Dieses Infiltrationsorgan wurde zur Modellierung ausgewählt, da an diesem Organ verschiedene Messeinrichtungen installiert sind, mit denen detaillierte Daten erfasst werden können. Diese Datengrundlage ermöglicht die Erstellung eines realitätsnahen Modells. Bei der Modellierung des Infiltrationsorgans 6 werden die jeweils benachbarten Organe 5 und 7 miteinbezogen, um eine mögliche gegenseitige Beeinflussung untersuchen und quantifizieren zu können.

Um mit dem Aufbau des Modells beginnen zu können, muss zunächst die Ausdehnung des Modells festgelegt werden. Das zu modellierende Objekt sollte möglichst zentral innerhalb des Modellgebiets liegen, wobei der Rand des Gebiets hydrogeologischen und hydrologischen Grenzen folgt, wie beispielsweise undurchlässige Ränder. Im Allgemeinen sollte das Modell nicht zu klein gewählt werden, um alle relevanten Prozesse im Modell und vor allem im Umkreis des zu modellierende Objekts ohne Einschränkungen und Beeinflussung durch die Randbedingungen abbilden zu können. Gleichzeitig sollte das Modell nicht zu groß gewählt werden, um die Berechnungsdauer des Modells so gering wie möglich zu halten. Nachdem der Modellrand definiert ist können alle relevanten Objekte im Modell eingearbeitet und schließlich das für die Simulation notwendige Finite-Element-Netz erzeugt werden. Dabei wird zunächst mit einem 2-D-Modell gearbeitet, welches nach der Netzerstellung über die vertikale Schichteinteilung in ein 3-D-Modell überführt wird.

Da im vorliegenden Fall der Modellierung des Organs 6 allgemein gültige Aussagen getroffen werden sollen, wird das Modellgebiet anhand der Richtwerte für das Grundwasser des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried festgelegt, welche aus langjährigen mittleren Grundwasserständen abgeleitet wurden unter Berücksichtigung mittlerer Fördermengen an den Entnahmebrunnen sowie der Grundinfiltration an den Infiltrationsorganen. Aus den Richtwerten wurden Grundwassergleichen erstellt, die zur Abgrenzung des Modellgebiets verwendet wurden und

die aufgrund ihrer Datengrundlage lagestabil sind. Bei der Untersuchung des Einflusses sehr hoher bzw. sehr niedriger Grundwasserstände auf die Infiltrationsleistung können die Randbedingungen im Modell manuell verändert werden und somit Szenarien mit sehr hohen bzw. sehr niedrigen Wasserständen betrachtet werden. In der folgenden Abbildung 7-7 ist die Modellabgrenzung für das Modell des Organs 6 dargestellt, wobei die roten Linien die Grundwassergleichen der Richtwerte zeigen. Die gelben Punkte mit den Ziffern markieren die Lage der Infiltrationsorgane und die blauen Punkte die Entnahmefrünnen des Wasserwerks Jägersburg. Da nicht nur die gekoppelte Innen- und Außenströmung im Nahbereich des Organs 6 untersucht werden soll, sondern auch die Wechselwirkungen zu den benachbarten Organen werden bei der Abgrenzung des Modellierungsbereichs die Infiltrationsorgane 5 – 9 in das Modell aufgenommen. Um das Modell jedoch gleichzeitig nicht zu groß zu wählen und für die Fragestellung irrelevante Strukturen aus dem Gebiet auszuschließen, werden die Entnahmefrünnen sowie die Organe 1 – 4 und 10 – 12 nicht mit einbezogen. Auf dieser Grundlage wurden die in schwarz abgebildeten Modellränder gewählt, wobei die Grundwassergleichen mit dem Wert 89,5 müNN als östlich gelegene Abgrenzung gewählt wurde und für die nordwestlich gelegene Abgrenzung eine Grundwassergleiche zwischen zwei bestehenden. Da der Bereich zwischen den Gleichen durch die gewählte Gleiche zu etwa 1/3 und 2/3 geteilt wird, wird für die westliche Abgrenzung ein Potential von 88,17 müNN definiert. Die Verbindung zwischen diesen beiden Gleichen sind Grundwasserstromlinien, wodurch an dieser Stelle ein Rand vorliegt, der mit einem undurchlässigen Rand gleichzusetzen ist. Da die Entnahmemengen der Brunnen in die Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplans miteinbezogen wurden sowie auch die Grundinfiltration der Infiltrationsorgane, sind die Modellränder als lagestabil einzustufen.



Abbildung 7-7: Gewählter Modellrand für die Modellierung des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald

Zusätzlich wurden weitere Gleichenpläne für dieses Gebiet aus dem Wasserrechtsverfahren der Infiltration im Jägersburger Wald von 2008 zum Vergleich herangezogen, um die Eignung der gewählten Modellränder zu bestätigen. Diese Gleichenpläne stellen dabei Momentaufnahmen zu einem bestimmten Zeitpunkt dar, mit denen überprüft wird, ob der Einflussbereich der Infiltrationsanlagen mit den gewählten Modellrändern komplett umfasst ist und die Modellränder einen ausreichenden Abstand aufweisen, sodass durch die Randbedingungen die

---

Berechnungsergebnisse nicht beeinflusst werden. An den beiden gewählten Rändern sind die Randbedingungen in Form von Potentialen aufgrund der Grundwasserstände definiert. Insgesamt ergibt sich eine Modellgröße von etwa 4,1 km<sup>2</sup>.

Alle Objekte innerhalb des Modellgebiets, die auch in die Modellierung miteinbezogen werden sollen, müssen als Strukturen implementiert werden, damit diese bei der Netzgenerierung berücksichtigt werden. Dabei müssen die Objekte abhängig von der Fragestellung abgebildet werden und alle für die Strömungsmodellierung relevanten Bestandteile integriert werden. Alle für die Modellierung unerheblichen Objekte können jedoch vereinfacht dargestellt oder gegebenenfalls weggelassen werden. Die Organe 5 - 9 liegen im Modellgebiet und müssen daher miteinbezogen und als Struktur eingearbeitet werden. Die Grundlage der Erstellung der Strukturen bilden die jeweiligen Lage- und Ausbaupläne der Infiltrationsorgane, die in Anlage C hinterlegt sind. Da die gekoppelte Innen- und Außenströmung an den Bohrlöchern untersucht werden soll, werden diese detailgenau als Strukturen umgesetzt.

Die einzelnen Kiesbohrlöcher wurden mit Hilfe der entsprechenden Gauß-Krüger-Koordinaten in das Modell implementiert. Dabei stellte sich heraus, dass die Bezeichnung der Koordinaten mit x und y in den Lageplänen genau umgekehrt ist als die Bezeichnung in der Modellierungssoftware. Das heißt der x-Wert der Pläne entspricht dem y-Wert im Modell und damit dem Hochwert. Zusätzlich muss zu den gegebenen Koordinaten noch die erste Ziffer ergänzt werden, also bei den x-Werten auf den Plänen eine 3 und bei den y-Werten eine 5, damit sie im Modellierungsprogramm richtig hinterlegt sind. Das heißt, dass zum Beispiel aus den Koordinaten für das Kiesbohrloch A des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald mit x = 508114,114 und y = 466386,697 die Werte x = 3466386,697 und y = 5508114,114 für das Modell werden.

Mit den gegebenen Durchmessern aus dem Plan der Kopfausbildung der Kiesbohrlöcher in Anlage C wurden durch Stützpunkte annähernd Kreise um die Mittelpunkte der Bohrlöcher erzeugt (s. Abbildung 7-8 auf der folgenden Seite). Diese Kreise ergeben sich aus dem Ausbauplan der Kiesbohrlöcher: Der äußerste Kreis stellt den äußeren Rand des Schachtrings mit einem Durchmesser von 2,64 m dar, der nächste Kreis ist der innere Rand des Rings mit 2,2 m als Durchmesser. Anschließend folgt der durch den Fundamentring verengte Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser von 1,8 m und der innerste Kreis stellt den Durchmesser der unterhalb des Fundamentrings liegenden Querschnittsverringerng und den eigentlichen Bohrdurchmesser mit 1,5 m dar. Durch die Berücksichtigung dieser Bauausführung können diese Bereiche von anderen abgegrenzt werden und ihnen innerhalb des Modells spezielle Attribute zugewiesen werden, wie beispielsweise die Festlegung eines entsprechenden  $k_f$ -Wertes für den Schachtring, um diesen als wasserundurchlässig zu definieren.

Um innerhalb der Kiesschüttung ein feines gleichmäßiges Netz zu erzeugen, welches für eine genaue Strömungsmodellierung in diesem Bereich und zur Untersuchung der gekoppelten Innen- und Außenströmung sowie der lokalen Geschwindigkeiten notwendig ist, kann mithilfe der von Spring angebotenen Tools ein Raster erzeugt werden. Die dadurch erzeugten Netzknoten werden anschließend in der Regel bei der Netzgenerierung berücksichtigt. Jedoch war dies nicht der Fall, sodass nach einer erfolglosen Fehlersuche die Knoten mittels einer konstruierten Struktur in das Modell eingearbeitet wurden. Dabei wurde abhängig vom Bohrlochmittelpunkt ein Raster für jedes Kiesbohrloch aller Organe im Modell berechnet und als Punktstruktur in das Modell eingefügt. Der Abstand zwischen den einzelnen Punkten beträgt dabei 25 cm bei einem Bohrdurchmesser von 1,5 m. Da das Infiltrationsorgan 6 im Mittelpunkt der Modellierung steht und hier genaue Rechenergebnisse für sichere Aussagen notwendig sind, wurde an diesem Organ eine Rasterweite von 10 cm gewählt. Die erzeugte Struktur ist in Abbildung 7-8 auf der folgenden Seite zu sehen, wobei links das gröbere und rechts das feinere Raster dargestellt sind inklusive, der Kreise für die verschiedenen Durchmesser.



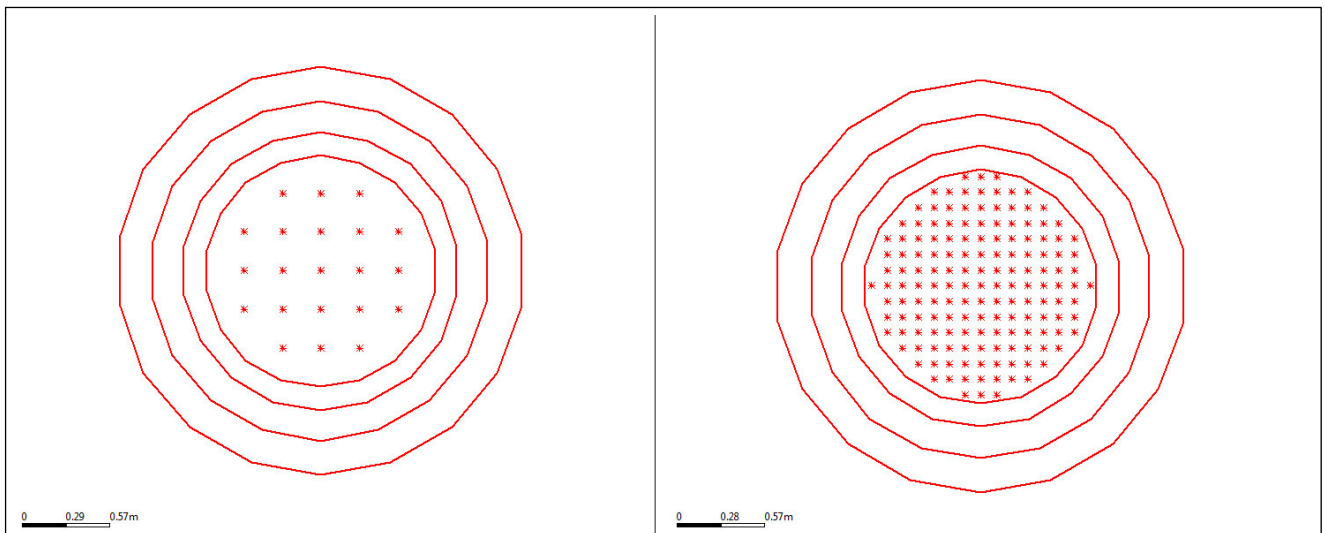


Abbildung 7-8: Erzeugte Strukturen für die Kiesbohrlöcher

Um bei der nach dem Modellaufbau folgenden Kalibrierung und Validierung die gemessenen Grundwasserstände an einzelnen Grundwassermessstellen im Modellgebiet mit einbeziehen zu können, werden diese mit Hilfe ihrer Koordinaten in das Modell als Strukturpunkte eingearbeitet (s. Abbildung D-6). Dadurch werden sie bei der Netzgenerierung berücksichtigt, sodass für diese Punkte Werte berechnet werden und die berechneten Wasserstände mit den gemessenen Werten verglichen werden können. In den Kiesbohrlöchern selbst sind Rammfilterlanzen mit unterschiedlichen Endteufen und einer Filterstrecke von 50 cm eingebaut, in welchen zeitweise Logger für die Grundwasserstandmessung installiert sind. Für die Modellierung wird vereinfacht angenommen, dass sich diese genau im Mittelpunkt des Kiesbohrlochkreises befinden.

```

Organ2.str - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?

ZKOR | l | @ 2 1 0 @ 96_kohlbruchgraben
3466016.645513651.89
3466069.005513565.00
3466222.425513459.92
3466422.765513319.82

ZKOR | p | @ 2 11 4.00 @ 97_Brunnen5
3466263.425513162.06

ZKOR | p | @ 2 11 4.00 @ 98_Brunnen6
3466626.485513384.07

ZKOR | p | @ 2 11 4.00 @ 99_Brunnen7
3466500.435513601.21

ZKOR | p | @ 2 11 4.00 @ 100_Brunnen8
3466290.585513893.28

ZKOR | p | @ 2 11 4.00 @ 101_Brunnen9
3466140.675514161.47

ZKOR | p | @ 2 11 4.00 @ 102_org2_Punkte_aussen
3466865.165513059.23
3466866.065513058.17
3466807.175513011.06
3466808.055513010.00

ZKOR | l | @ 2 1 0 @ 103_org2_SSG_aussen
3466865.165513059.23
3466866.065513058.17
3466808.055513010.00
3466807.175513011.06
3466865.165513059.23

```

Abbildung 7-9: Ausschnitt aus der Strukturdatei

Sofern alle relevanten Objekte als Strukturen in das Modell eingearbeitet sind, kann mit der Netzgenerierung begonnen werden. Dazu werden aus den Strukturen Konturen erstellt, welches die eigentliche Objektart darstellt, die bei der Netzerstellung von dem Modellierungsprogramm berücksichtigt wird. Man kann ebenso direkt Konturen in das Modell einarbeiten, jedoch bieten Strukturen den Vorteil, dass es für diese im Softwareumfang von Spring eine separate Textdatei gibt, mit deren Hilfe die Strukturen außerhalb des Programms vergleichsweise einfach erstellt und bearbeitet werden können. Abbildung 7-9 zeigt einen Ausschnitt aus der Strukturdatei des Modells für



den Bereich Jägersburger Wald. Die Strukturen sind einzeln aufgelistet mit der Art der Struktur: „p“ für eine Punktstruktur und „l“ für eine Linienstruktur. Für einen besseren Überblick legt man für die einzelnen Strukturen entsprechende Bezeichnungen fest. Die Daten der Strukturen bestehen dabei lediglich aus dem Rechts- und Hochwert mit zwei Nachkommastellen und damit der Lage der Struktur innerhalb des Modells. Die Konturen sind ebenfalls in dieser Datei mit den entsprechenden Koordinaten enthalten, jedoch lediglich nach Punkt- und Linienkontur aufgeteilt und nicht einzeln aufgelistet mit speziellen Bezeichnungen wie bei den Strukturen, sodass eine Identifizierung und somit eine einfache Bearbeitung der Konturen nicht möglich ist.

Damit um die erzeugten Kreisstrukturen der einzelnen Kiesbohrlöcher ein gleichmäßiger Übergang von kleinen Netzelementen zu großen entsteht, können mit Hilfe eines hierfür zur Verfügung gestellten Tools (Brunnenparameter) Konturpunkte erstellt werden. Die Koordinaten dieser Punkte werden entsprechend einer Formel in Abhängigkeit vom gewählten Mittelpunkt berechnet, wobei drei Parameter frei wählbar sind, sodass die Diskretisierung je nach Einzelfall gewählt werden kann. Die Anzahl und Verteilung der Konturpunkte hängt dabei von der Wahl dieser drei Parameter ab. In Abbildung 7-10 sind die hierdurch erstellten Punkte um den Mittelpunkt eines Kiesbohrlochs zu sehen. Dies wurde für jedes Kiesbohrloch durchgeführt, jedoch wurden die dadurch erzeugten Konturpunkte, wie auch bei der zuvor erwähnten Rastererstellung durch das Programm, bei der anschließend durchgeführten Netzgenerierung nicht berücksichtigt. Um dieses Problem zu umgehen, wurden die Konturpunkte manuell als Knotenpunkte implementiert.

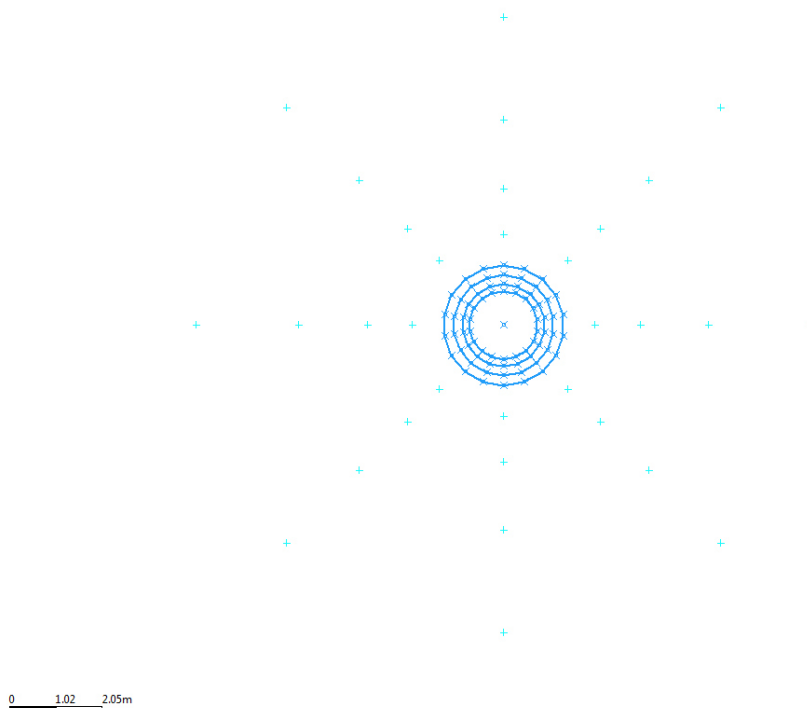
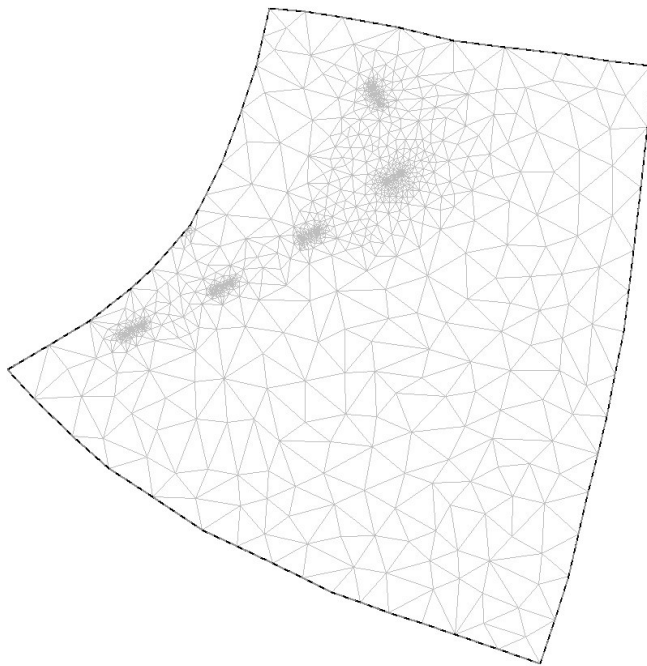


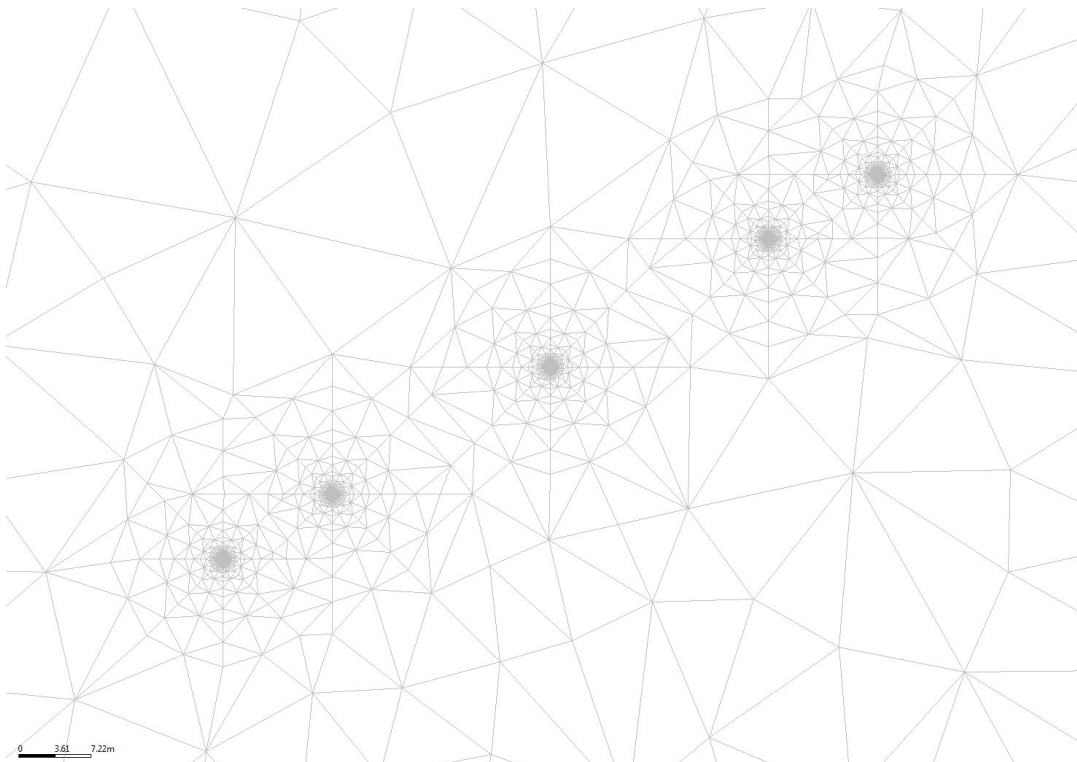
Abbildung 7-10: Erzeugte Konturpunkte um den Mittelpunkt eines Kiesbohrlochs

Für die anschließend vom Programm durchgeführte Netzgenerierung können verschiedene Parameter festgelegt werden. Zum einen wurde die maximale Fläche der Elemente auf 15.000 m<sup>2</sup> begrenzt und der minimal zulässige Winkel auf 20 ° gesetzt, damit ein gleichmäßiges Netz aus Finite-Elementen erzeugt wird. Das hierbei erzeugte Grundnetz ist mit mehreren Abbildungen in Anlage D dokumentiert. Da das generierte Netz um die einzelnen Organe sowie zwischen diesen und vor allem der Übergang vom feinen Bereich innerhalb der Bohrlöcher nach außen zu grob waren, wurde das Netz an diesen Stellen manuell verfeinert. Das dadurch entstandene Netz ist in Abbildung 7-11 auf der folgenden Seite dargestellt. Abbildung 7-12, ebenfalls auf der folgenden Seite, zeigt das Netz im näheren Umfeld des Infiltrationsorgans 6, weitere Darstellungen des verfeinerten Netzes, unter anderem vom Nahbereich eines Kiesbohrloches, finden sich in Anlage D.



0 160 320m

Abbildung 7-11: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet



0 361 722m

Abbildung 7-12: Verfeinertes Netz im Nahbereich des Organs 6

Nach der Netzgenerierung wird mit der Schichteinteilung das 2-D-Modell in ein 3-D-Modell überführt. Zunächst werden für die derzeit einzige vorhandene Knotenschicht die Werte der Geländeoberkante als z-Koordinaten zugewiesen. Dabei wurden die entsprechenden Werte aus dem großräumigen Modell von BGS UMWELT für das Hessische Ried exportiert und in das Modell des Jägersburger Waldes

---

importiert. An den Stellen, an denen genaue Werte der Geländeoberkante durch hinterlegte Daten im Programm GW-Manager (envi-systems GmbH) oder in Ausbauplänen vorliegen, werden diese Werte übernommen. Hierbei werden die zuvor zugewiesenen Daten der Geländeoberkante aus dem großräumigen Modell für alle Knoten in einem Umkreis von etwa vier Metern gelöscht. Anschließend werden mit Hilfe von Spring den Knoten neue Werte durch Interpolation in Abhängigkeit von dem gemessenen Wert und den im Umfeld vorhandenen Werten zugewiesen, damit ein gleichmäßiger Übergang entsteht. Im Gegensatz zu den Lageplänen der Infiltrationsorgane im Gernsheimer Wald sind in den Plänen der Organe im Jägersburger Wald keine Höhenangaben gegeben und im GW-Manager ist für die einzelnen Organe jeweils nur ein Wert pro Organ und nicht für jedes einzelne Bohrloch hinterlegt. Da genaue Angaben zur Höhenlage am Untersuchungsorgan 6 für die Modellierung unumgänglich sind, wurde die Oberkante des Schachtdeckels der einzelnen Kiesbohrlöcher am Organ 6 vor Ort neu eingemessen. Mit diesen Werten und dem Plan der Kopfausbildung können die weiteren Werte wie Geländeoberkante und Lage der Filtersandschicht bestimmt werden. Aufgrund des Zeitaufwands konnten keine Vermessungen an den restlichen im Modellgebiet vorhandenen Organen durchgeführt werden, sodass für diese die im GW-Manager hinterlegten Werte verwendet werden.

Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters wird als Unterkante des Modells definiert, wobei die entsprechenden Werte ebenfalls aus dem großräumigen Modell von BGS UMWELT importiert werden. Der Grundwasserleiter im Modellgebiet hat eine Mächtigkeit zwischen 112 m und 135 m, wobei diese von Westen nach Osten in Richtung des Odenwaldes zunimmt. In Anlage D ist mit Abbildung D-8 eine Übersicht über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters zu finden. Mit den hierdurch festgelegten z-Koordinaten für die Geländeoberkante und die Unterkante des Modells wird die erste Schicht des Modells erzeugt, die sich über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters erstreckt. Anschließend werden durch Zwangspunkte, die sich aus dem Ausbau der Infiltrationsorgane und der Geologie des Grundwasserkörpers ergeben, die daraus folgenden Zwangsschichten erstellt. Zu den Zwangspunkten zählen unter anderem die Ausweitung bzw. Einengung des Kiesbohrlochdurchmessers, die Lage der Filtersandschicht oder auch die Lage von Tonschichten im Grundwasserkörper. Für den Bereich der Verfilterung der Rammfilterlanzen wird die Mitte der Höhenlage verwendet. Zur Berechnung der Schichten wird die in Anlage E hinterlegte Tabelle E-3 verwendet. Anhand der z-Koordinaten der Zwangspunkte wird die Mächtigkeit der jeweiligen Schicht berechnet. Dabei wird mit dem Verhältnis der bestehenden zu der zu erzeugenden Schicht das Teilungsverhältnis für die Schichtteilung berechnet. Eine genaue Erläuterung zur Berechnung findet sich unter der Tabelle E-3.

Je nach Fragestellung und Modellzusammensetzung kann es vorteilhaft sein, bereits nach der Schichteinteilung durch die Zwangspunkte einige Attribute zu definieren, da diese anschließend bei der Erzeugung neuer Schichten automatisch auf die neuen Knoten und Elemente übertragen werden. Zu unterscheiden sind dabei Attribute, die den Knoten zugewiesen werden, wie z. B. die Entnahme von Grundwasser, und solche, die aufgrund ihres Flächenbezugs den Elementen zugewiesen werden, wie bspw. die Grundwasserneubildung. Durch die bisher erzeugten Schichten sind alle Höhenlagen der im Modellgebiet vorhandenen Änderungen der Durchlässigkeitsbeiwerte definiert, sodass die entsprechenden  $k_f$ -Werte den Elementen zugeordnet werden können. Für die Kiesbohrlöcher sind dies bspw. die Elemente, die die Schachtwand darstellen oder auch die Lage der Filtersandschicht.

Aus dem großräumigen Modell der BGS UMWELT für das Hessische Ried wird der Durchlässigkeitsbeiwert des Grundwasserkörpers in das Modell des Jägersburger Waldes importiert. Der Grundwasserleiter hat überwiegend eine Durchlässigkeit von  $7 \cdot 10^{-4}$  m/s, nur in einem zwischen 100 m und 300 m breiten Streifen an der westlichen Modellgrenze liegt der Wert bei  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s. Eine Darstellung der  $k_f$ -Werte ist mit Abbildung 7-14 in Abschnitt 7.3 gegeben. Unterhalb der unteren Tonschicht liegt der Wert für die Durchlässigkeit im gesamten Modellgebiet bei  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s. Diese Werte ergaben sich durch die Kalibrierung des großräumigen Modells und sind als gesicherte Werte anzusehen. Der Grundwasserleiter wird örtlich von zwei Tonschichten in verschiedene Grundwasserstockwerke geteilt, deren Lage nochmals mit Bohrprofilen, die für das Modellgebiet vorhanden sind, verifiziert wurde. In Abbildung D-9 und Abbildung D-10 in Anlage D ist die

Mächtigkeit der beiden Tonschichten im Modellgebiet dargestellt. Die obere Tonschicht beginnt ab einer Tiefe von etwa 23 muGOK und weist einen  $k_f$ -Wert von  $9 \cdot 10^{-6}$  m/s auf. Jedoch ist diese Tonschicht unter den Infiltrationsorganen nicht vorhanden, sondern erstreckt sich diagonal von der rechten oberen Ecke des Modellgebiets bis zur Mitte der südlichen Abgrenzung. Ihre Mächtigkeit nimmt entgegen der Fließrichtung des Grundwassers zu. Unterhalb der ersten Tonschicht hat der Grundwasserkörper die gleiche Durchlässigkeit wie oberhalb des Tones. Die untere Tonschicht beginnt ab einer Tiefe von etwa 41 muGOK, weist einen  $k_f$ -Wert von  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s auf und erstreckt sich ebenso diagonal über den Modellbereich, wobei seine Ausbreitung die Infiltrationsorgane 6 und 7 erreicht. Unterhalb der zweiten Tonschicht, das heißt ab etwa 42 muGOK auch in dem Bereich, in dem keine Tonschicht vorhanden ist, liegt die Durchlässigkeit über das gesamte Modellgebiet bei  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Tabelle 7-3: Zuweisung der Durchlässigkeit für das Modell im Jägersburger Wald

Bereich	Elementschicht Nr.	Medium	$k_f$ -Wert [m/s]
Verfüllbereich	1	Luft	1
	2 - 3	Filtersand	$1 \cdot 10^{-3}$
	4 - 9	Filterkies	$1 \cdot 10^{-2}$
1. Ring	1	Luft	1
	2 - 3	Filtersand	$1 \cdot 10^{-3}$
	4	Filterkies	$1 \cdot 10^{-2}$
	5	Wand	$1 \cdot 10^{-20}$
2. Ring	1	Luft	1
	2	Filtersand	$1 \cdot 10^{-3}$
	3 - 5	Wand	$1 \cdot 10^{-20}$
3. Ring	1 - 5	Wand	$1 \cdot 10^{-20}$

In Tabelle 7-3 sind die  $k_f$ -Werte für die Kiesbohrlöcher in Abhängigkeit des Bereichs aufgelistet, die den entsprechenden Elementschichten zugewiesen werden. Der Verfüllbereich stellt dabei den Bereich dar, in dem der Filterkies bis zur Endteufe eingebracht ist. In Abbildung 7-8 auf Seite 42, welche die erzeugten Strukturen der Kiesbohrlöcher zeigt, ist dies der Bereich, in dem die Rasterknoten dargestellt sind. Die Ringe 1 – 3 werden durch die erzeugten Linienstrukturen in Form von Kreisen abgegrenzt und definieren die Lage der Schachtwand sowie der Querschnittsverengungen des Kiesbohrlochs. Für die Durchlässigkeitsbeiwerte werden die nach Hazen berechneten Werte übernommen (s. 7.1). Für den Einstaubereich innerhalb des Kiesbohrlochs wurde ein Wert von 1 m/s und für die Bauwerkswände als undurchlässiger Bereich ein Wert von  $1 \cdot 10^{-20}$  m/s definiert.

Die Abbildung 7-13 auf der folgenden Seite zeigt einen Schnitt des Kiesbohrlochs A des Organs 6 über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters (links) und im Nahbereich (rechts). Farblich dargestellt sind dabei die unterschiedlichen Werte der Durchlässigkeit. Deutlich zu erkennen ist die Lage der oberen Tonschicht und der ab der Tonschicht geringere  $k_f$ -Wert des Grundwasserleiters. In diesem Bereich ist die untere Tonschicht nicht vorhanden. Auf dem rechten Bild ist die Geometrie der Schachtwand in schwarz ersichtlich. Ebenso erkennbar ist die Lage der Filtersandschicht oberhalb der Kiesverfüllung im Bohrloch. Ein weiterer Schnitt, der das gesamte Infiltrationsorgan 6 zeigt, ist mit Abbildung D-11 in Anlage D gegeben.

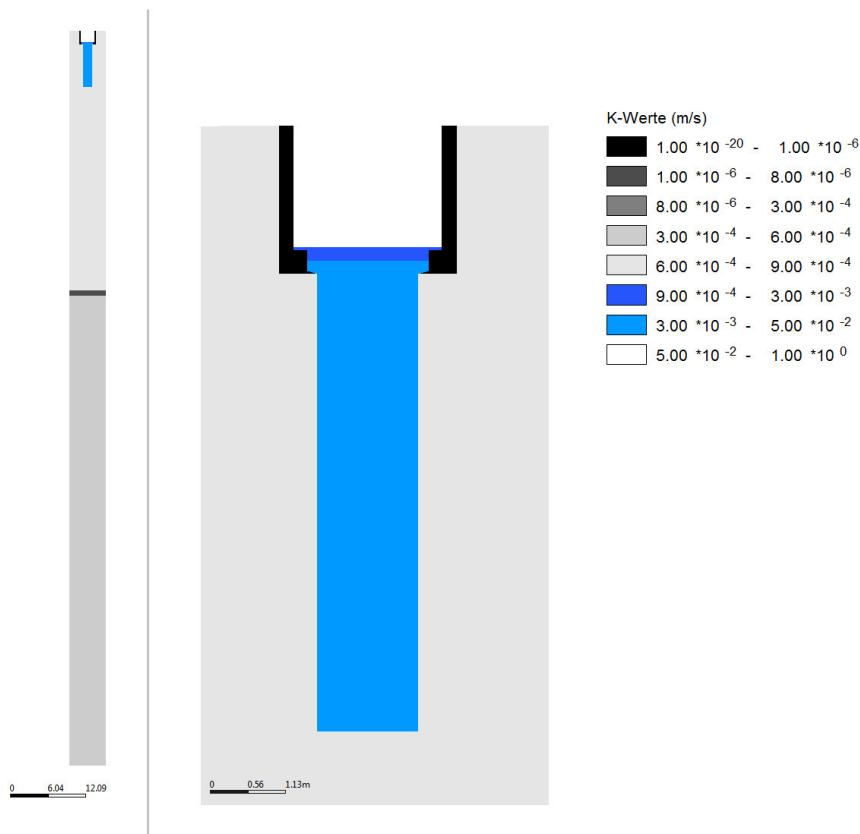


Abbildung 7-13: Darstellung der Durchlässigkeit im Bereich des Bohrlochs A des Organs 6

Nach der Zuweisung der  $k_f$ -Werte erfolgt eine weitere Schichtteilung. Da die Strömung im Nahbereich des Infiltrationsorgans 6 untersucht wird, im speziellen die gekoppelte Innen- und Außenströmung, wird im Bereich der Kiesbohrlöcher eine vergleichsweise feine Diskretisierung über die Tiefe vorgenommen. Dabei wird die Mächtigkeit der Elementschichten auf maximal 20 cm festgelegt. Geringere Mächtigkeiten aufgrund des Ausbaus der Infiltrationsorgane bleiben bestehen, wobei der Übergang schrittweise erfolgt. Ein Beispiel hierfür ist die Elementschicht ab Beginn des Filtersandes bis zur ersten Einengung des Bohrlochquerschnitts, welche eine Mächtigkeit von 5 cm aufweist. Der Übergang von den darüber liegenden Schichten bis zu dieser Schicht erfolgt gleichmäßig von zunächst 20 cm auf 10 cm und anschließend auf 5 cm. Dabei wurde im Allgemeinen bei der Schichtteilung darauf geachtet, dass die direkt angrenzenden Schichten maximal die doppelte bzw. minimal die halbe Mächtigkeit haben und somit keine zu großen Sprünge entstehen. Ab einem Meter unter der Endteufe der Infiltrationsorgane nehmen die Schichten in ihrer Mächtigkeit zu, da mit der Tiefe der Einfluss der Infiltration auf die Grundwasserströmung abnimmt und demnach auch keine vergleichbar genauen Berechnungsergebnisse erforderlich sind wie im Nahbereich der Infiltration. In Anlage E ist die Tabelle E-4 hinterlegt, in der die komplette Schichteinteilung für das Modell des Kiesbohrlochs aufgelistet ist. Das Modell besteht aus 76 Knotenschichten und 75 Elementschichten. In Anlage D befindet sich die Abbildung D-12, in der ein Ausschnitt der Elementschichten im Nahbereich des Kiesbohrlochs A des Infiltrationsorgans 6 dargestellt ist, wobei links die Schichteinteilung ausschließlich durch die Zwangspunkte zu sehen ist und rechts die finale Schichteinteilung.

Ist die Schichteinteilung abgeschlossen, können alle weiteren relevanten Attribute den Knoten bzw. Elementen zugewiesen werden. Dazu gehört das Potential an der westlichen und östlichen Gebietsabgrenzung, welches durch den entsprechenden Wert der Grundwassergleichen aus den Richtwerten des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried definiert ist. Für die östliche Abgrenzung liegt der Wert bei 89,5 müNN und für die westliche Abgrenzung bei 88,125 müNN. Der Wert der Westabgrenzung wird während der Kalibrierung überprüft und ggf. angepasst, da an dieser Stelle die gewählte Abgrenzung zwischen zwei bestehenden Grundwassergleichen liegt und es sich daher um einen abgeschätzten Wert handelt.



---

Für die Grundwasserneubildung im Modellgebiet wurden die entsprechenden Werte aus dem großräumigen Modell der BGW UMWELT für das Hessische Ried übernommen, die über ein anderes Modellierungsprogramm für dieses Gebiet bestimmt wurden. Im Modell wird die Neubildung mit dem Attribut FLAE für eine Flächenversickerung den entsprechenden Finite-Elementen zugewiesen. Für das Modellgebiet Jägersburger Wald ergeben sich daher Werte von 40 – 100 mm/a für die Grundwasserneubildung. In Anlage D ist mit Abbildung D-13 eine Übersicht über die Verteilung der Grundwasserneubildung im Gebiet gegeben.

Mit dem Attribut PORO wird die Porosität der im Modellgebiet vorhandenen Medien definiert. Für den Grundwasserkörper sowie für die Filterschichten der Kiesbohrlöcher wird ein Wert von 0,2 festgelegt. Dem Einstaubereich innerhalb der Bohrlöcher wird ein Wert von 1 zugewiesen.

Zu- und Abflussmengen im Modell werden mit dem Attribut KNOT einem entsprechenden Knoten zugewiesen. Abflussmengen, wie auch Entnahmemengen aus Brunnen, sind dabei negative Werte und Zuflussmengen, wie bspw. Infiltrationsmengen, werden als positive Werte definiert. Zunächst werden den einzelnen Kiesbohrlöchern mittlere Infiltrationsmengen von etwa 9 m<sup>3</sup>/h zugewiesen. Während der Kalibrierung und bei der anschließenden Betrachtung verschiedener Szenarien können diese Werte entsprechend angepasst werden.

Bei Spring ist die Anisotropie, also das Verhältnis von vertikaler Durchlässigkeit zu horizontaler Durchlässigkeit, mit 0,1 voreingestellt. Dies wird allgemein als eine realitätsnahe Einschätzung für einen natürlich gewachsenen Boden angesehen. Im Bereich der Kiesbohrlöcher ist dies allerdings nicht der Fall, weil dort der Bereich mit Kies und Sand neu verfüllt wurde. Demnach ist für das Verhältnis dort ein höherer Wert zu erwarten. Für die Modellierung wird daher angenommen, dass das Verhältnis bei 1,0 liegt und damit isotrop ist.

### **7.3 Analyse der für die Kalibrierung sensitiven Parameter**

Sobald der Modellaufbau abgeschlossen ist, kann eine erste Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, bei der die für die Kalibrierung des Modells relevanten Parameter untersucht werden. Zunächst wird jedoch überprüft, ob das erstellte Modell in sich schlüssig ist oder ob Fehler bei der Modellierung gemacht wurden. Dies wird mit einer einfachen stationären Strömungsberechnung ohne Infiltrationsmengen durchgeführt. Die Berechnung einer einfachen stationären Strömung mit Spring erfolgt iterativ und beruht auf Grundlage einer Differentialgleichung durch Kopplung des Darcy-Gesetzes mit der Kontinuitätsbedingung (König et al, 2017, S. 284ff.). Vor der Berechnung können manuell die Iterationsschritte festgelegt werden, wobei im vorliegenden Fall eine Anzahl von fünf Iterationsschritten definiert wurde. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung G-1 in Anlage G in Form der resultierenden Grundwassergleichen im Modellgebiet dargestellt. Die Grundwassergleichen verlaufen gleichmäßig und das Grundwasser fließt vom Ostrand in Richtung des Westrandes. Da keine Unregelmäßigkeiten bei den Gleichen auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass keine groben Fehler bei der Modellerstellung gemacht wurden.

Zusätzlich wird eine einfache stationäre Strömungsberechnung mit Infiltrationsmengen durchgeführt, wobei auf die Grundinfiltration im Jägersburger Wald von 2,5 Mio. m<sup>3</sup>/a zurückgegriffen wird, welche auch für die Festlegung der Richtwerte berücksichtigt wurde. Diese Infiltrationsmengen belaufen sich pro Kiesbohrloch auf etwa 5 m<sup>3</sup>/h. Das Ergebnis dieser Simulation ist in Abbildung 7-14 auf der folgenden Seite zu sehen. Zusätzlich sind die  $k_f$ -Werte farblich gekennzeichnet, wobei der kleinere blaue Bereich einen Wert von  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s aufweist und der andere Bereich einen Wert von  $7 \cdot 10^{-4}$  m/s. Der Einfluss der Infiltration ist örtlich durch eine Erhöhung des Grundwassers zu erkennen, wobei der Einflussbereich vergleichsweise gering ausfällt. Dies ist auf die geringe Infiltrationsmenge auf Basis der Grundinfiltration zurückzuführen. Auch hier sind keine Unregelmäßigkeiten ersichtlich.

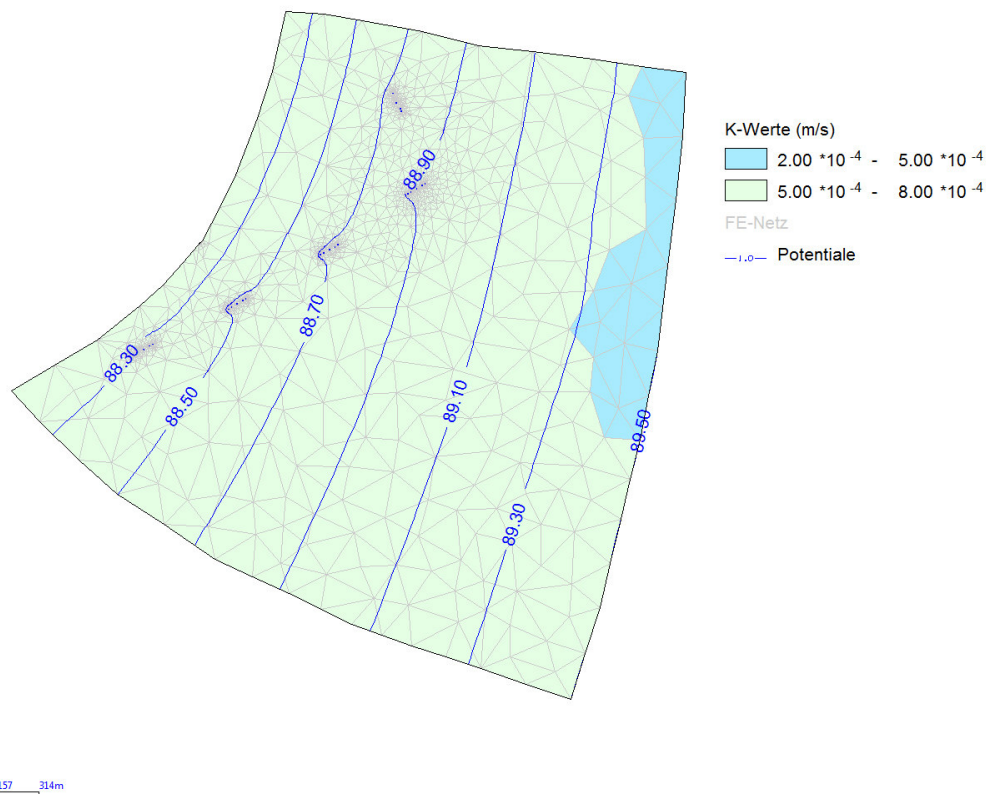


Abbildung 7-14: Simulierte Grundwassergleichen im Modellgebiet Jägersburger Wald mit Infiltrationsmengen

Anschließend wird eine grundlegende Betrachtung der Strömungs- und Druckverhältnisse innerhalb eines Kiesbohrlochs sowie im näheren Umfeld durchgeführt. Zusätzlich dazu erfolgt eine Untersuchung der für die Kalibrierung des Modells relevanten Parameter.

### 7.3.1 Innen- und Außenströmung

Die Durchlässigkeit im Infiltrationsorgan und im Aquifer stehen in gegenseitiger Wechselwirkung: Es liegen gekoppelte Strömungsverhältnisse vor. In Abbildung 7-15 auf der folgenden Seite sind die aus einer einfachen stationären Strömungsmodellierung resultierenden Druckverhältnisse dargestellt. Zu sehen sind zwei Kiesbohrlöcher, bei denen der Filterkies orange und der Filtersand gelb eingefärbt ist. Ebenso abgebildet sind die Grundwasseroberfläche, der Überstau in den Kiesbohrlöchern und die Potentialverteilung aufgrund der Infiltration. Ist die Durchlässigkeit des Filterkieses größer als die des Anstehenden, liegt ein annähernd gleichmäßiger Abstrom über die Tiefe des Organs vor, da die Potentialverluste im Inneren des Kiesbohrlochs geringer sind. Dies ist auf der linken Seite der Abbildung zu erkennen. Bei der Darstellung rechts ist die Durchlässigkeit im Bohrloch geringer als die des Anstehenden. Hier tritt das infiltrierte Wasser hauptsächlich im oberen Bereich in den umgebenden Grundwasserleiter über. Dadurch findet bereits im Filtersand sowie im oberen Teil des Filterkieses der Großteil des Potentialabbaus statt.

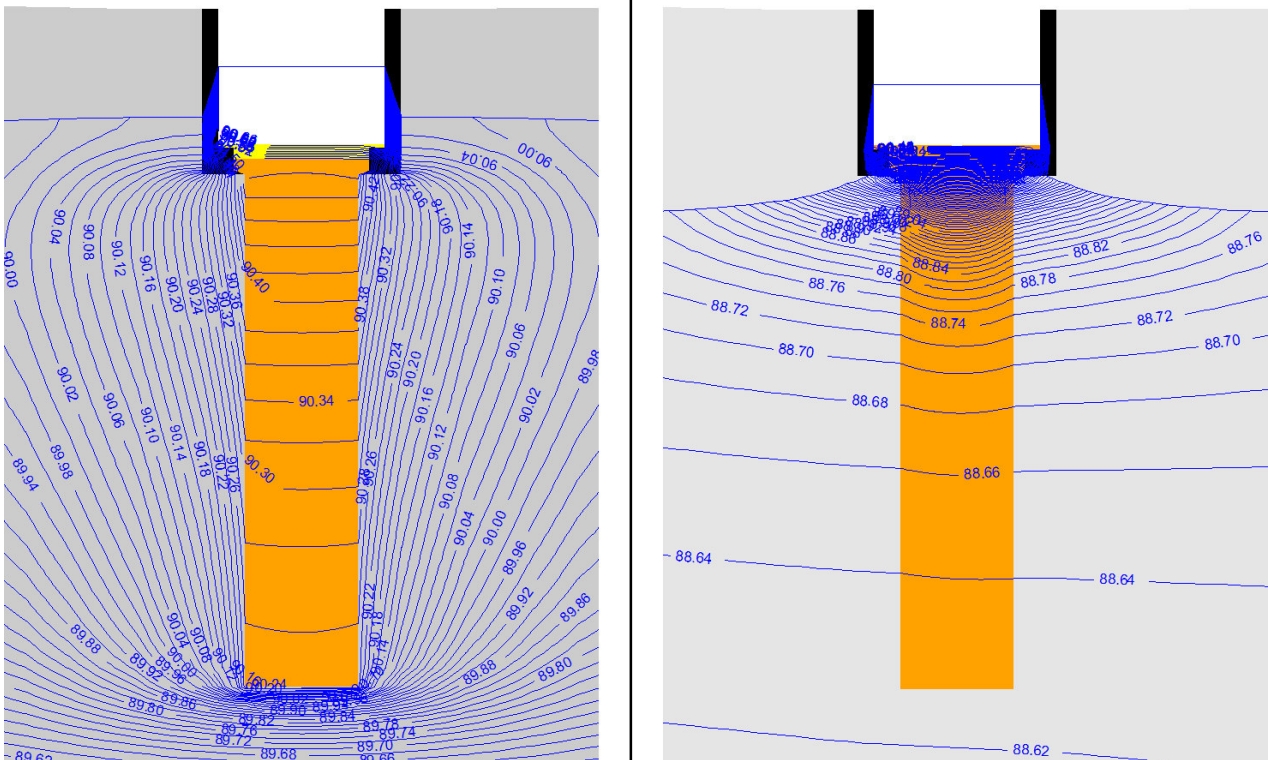


Abbildung 7-15: Vergleich der resultierenden Druckverteilungen bei zwei verschiedenen Szenarien

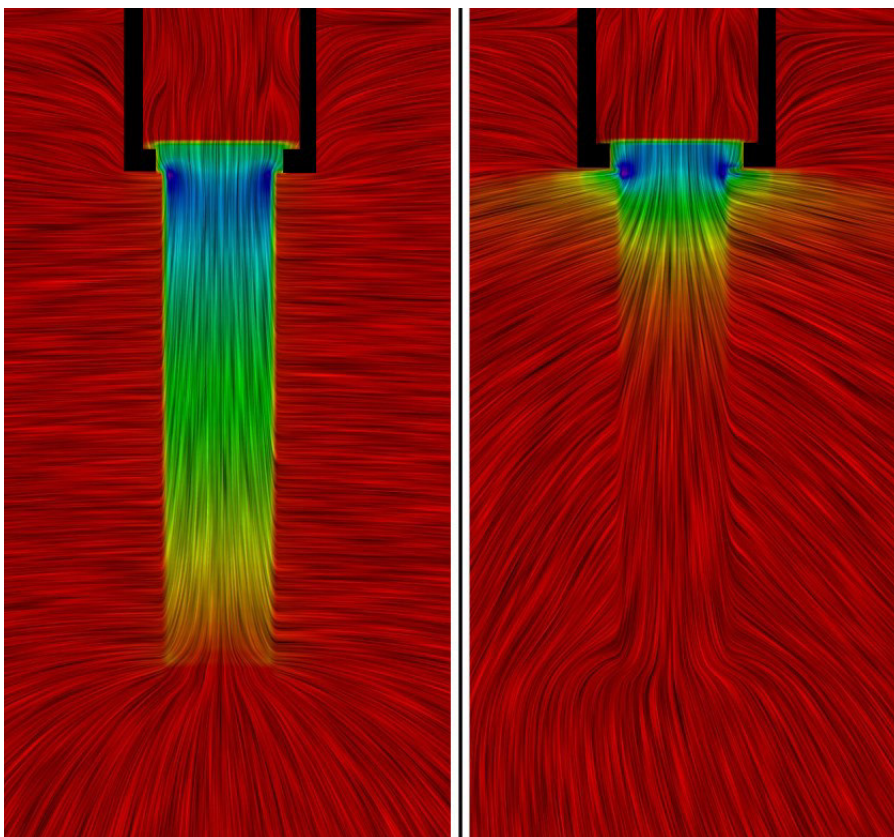


Abbildung 7-16: Schlierendarstellung der Fließrichtung bei zwei verschiedenen Szenarien

Durch eine Darstellung mittels eines Schlierenbilds werden die resultierenden Fließrichtungen beider Szenarien deutlich (s. Abbildung 7-16). Zu erkennen ist hierbei der gleichmäßige Abstrom über die

Tiefe des Kiesbohrlochs im linken Bild und der hauptsächlich im oberen Bereich stattfindende Austritt des Infiltrationswassers in das Anstehende im rechten Bild. Das Verhältnis der Fließgeschwindigkeiten zu einander wird hierbei farblich dargestellt. Rot steht für niedrige und blau für hohe Fließgeschwindigkeiten. Bei beiden Szenarien liegen im oberen Bereich des Bohrlochs die höchsten Geschwindigkeiten vor. Jedoch besteht bei einer Schlierendarstellung keine Möglichkeit der genauen Skalierung der Geschwindigkeiten.

Bei einer einfachen stationären Strömungssimulation mit Spring werden für jedes Finite-Element die Abstandsgeschwindigkeiten berechnet. Die resultierenden Geschwindigkeiten der beiden Szenarien sind in Abbildung 7-17 über unterschiedliche Farbbereiche markiert. Bei einem größeren Durchlässigkeitsbeiwert im Inneren des Bohrlochs nimmt mit dem gleichmäßigen Abstrom über die Tiefe ebenso die Abstandsgeschwindigkeit ab. Beim Übergang zum Anstehenden reduziert sich die Geschwindigkeit auf kurzer Strecke zu  $0 - 5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ist die Durchlässigkeit des Anstehenden größer als die des Filtermaterials, so reduziert sich die Abstandsgeschwindigkeit bereits im oberen Bereich des Bohrlochs und ab der Hälfte der Fließstrecke liegt nur noch eine Geschwindigkeit von  $0 - 1 \text{ m}^3/\text{h}$  vor. Dazu sei zu erwähnen, dass zur Erzeugung der beiden Szenarien unterschiedliche Infiltrationsmengen angesetzt wurden. Die Infiltrationsmenge für das Szenario des linken Bilds liegt bei  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  und beim rechten Bild bei  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ , was sich in den unterschiedlichen Werten der Abstandsgeschwindigkeiten widerspiegelt. Eine genaue Analyse der resultierenden Fließgeschwindigkeiten beim Infiltrationsbetrieb wird in Kapitel 7.5 durchgeführt.

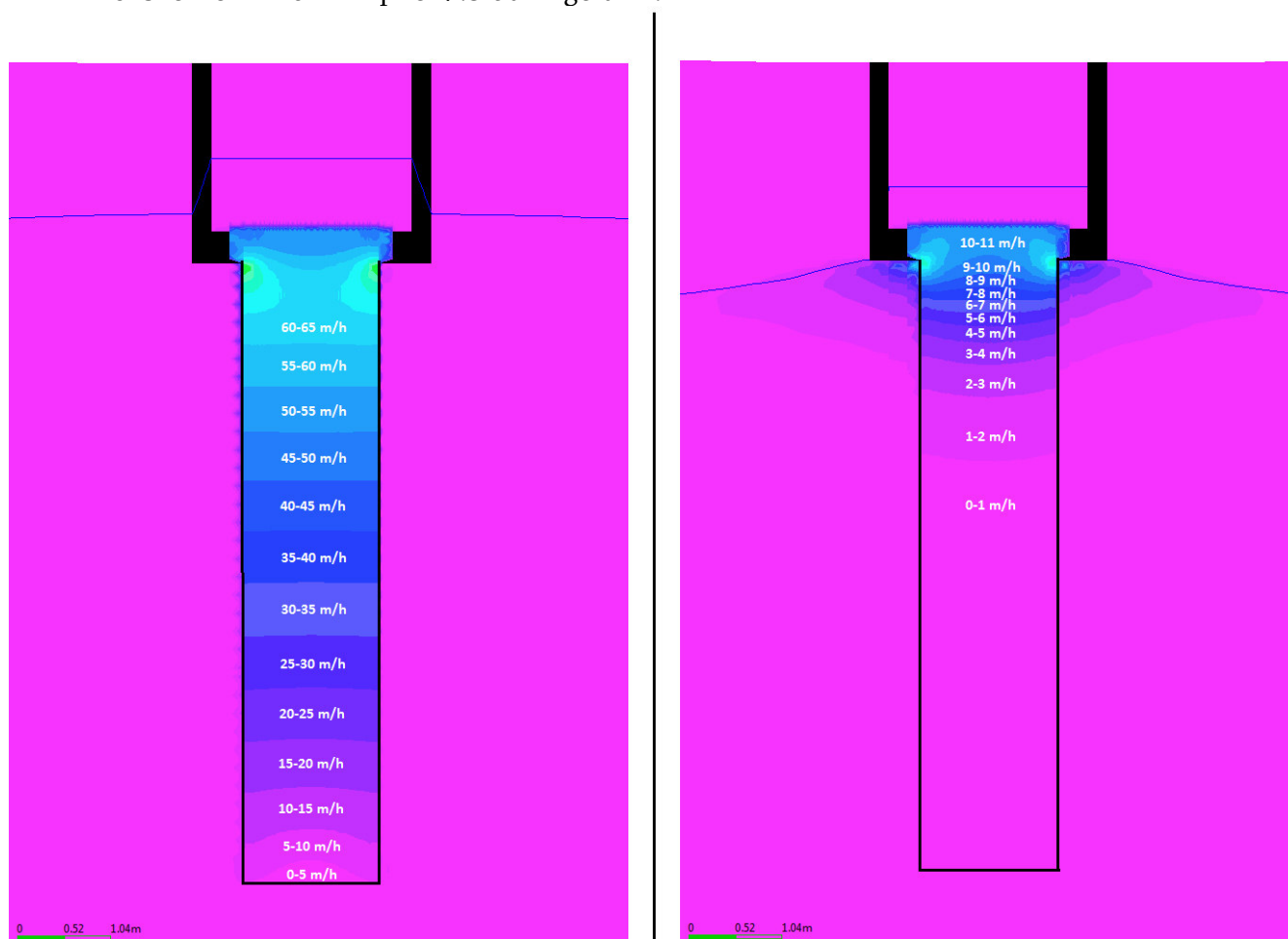


Abbildung 7-17: Vergleich der resultierenden Geschwindigkeiten bei zwei verschiedenen Szenarien



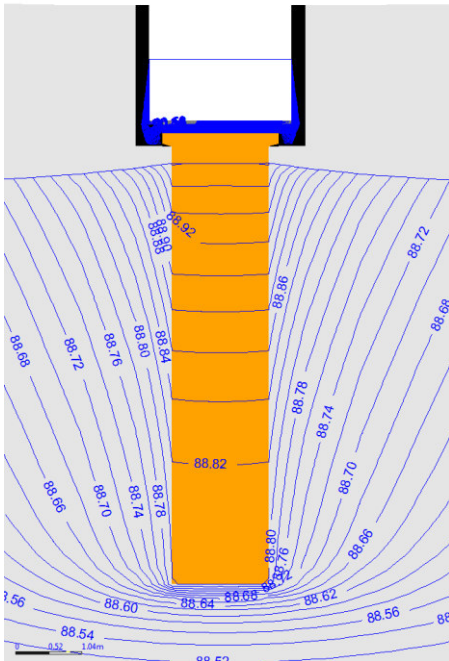


Abbildung 7-18: Darstellung entkoppelter Strömungsverhältnisse

Abhängig von verschiedenen Parametern treten beim Kiesbohrloch zwei unterschiedliche Strömungsverhältnisse auf: gekoppelte und entkoppelte. Beide Darstellungen in Abbildung 7-15 auf Seite 50 zeigen gekoppelte Strömungsverhältnisse. Hierbei sind die Druckverhältnisse im Kiesbohrloch neben dem Grundwasserstand auch von der Überstauhöhe und damit der Infiltrationsmenge abhängig. Sinkt der Grundwasserspiegel, die Infiltrationsmenge oder verringert sich die Durchlässigkeit der Filtersandschicht, kann es zum Ablösen der Strömung kommen. Dies ist in der oben stehenden Abbildung 7-18 dargestellt. Dabei liegen zwei hydraulisch voneinander entkoppelte Systeme vor. Die Infiltrationsleistung wird dabei ausschließlich durch die Durchströmung der Filtersandschicht bestimmt.

### 7.3.2 Parametervariation und deren Auswirkung auf die Infiltrationsleistung

Über verschiedene Simulationen wird nachfolgend eine Untersuchung der für die Kalibrierung relevanten Parameter durchgeführt. Für diese Untersuchungen sind in Tabelle 7-4 auf der folgenden Seite die Werte der zwei Grundzustände aufgelistet, wobei Grundzustand 1 für die Untersuchung mit gekoppelten Fließverhältnissen verwendet wird und Grundzustand 2 für entkoppelte Fließverhältnisse. Bei einem mittleren Grundwasserstand im Bereich der Richtwerte resultiert mit den Werten des Grundzustands 1 am Infiltrationsorgan 6 ein Überstau zwischen 30 – 80 cm. Dabei liegt der Überstau an den Kiesbohrlöchern A und B etwa 35 cm unter dem der anderen Kiesbohrlöcher. Trotz gleicher Randbedingungen weicht der Überstau voneinander ab, was in erster Linie auf die unterschiedliche geodätische Lage zurückzuführen ist. Die Bohrlöcher A und B liegen etwa 40 cm höher als die anderen Bohrlöcher. Das bedeutet, dass an den Bohrlöchern A und B ein höheres hydraulisches Potential bei gleichem Grundwasserstand vorliegt als bei den anderen drei Bohrlöchern, sodass bei gleicher Infiltrationsmenge ein geringerer Überstau resultiert. Bei der Variation der Parameter werden übergeordnet die zwei Szenarien, entkoppelte und gekoppelte Fließverhältnisse, betrachtet. Dabei ist die Infiltrationsmenge eine vorgegebene Größe, sodass als Simulationsergebnis die Überstauhöhe resultiert. Die Untersuchung erfolgt auf diese Weise, da bei der anschließenden Kalibrierung die Infiltrationsmenge ebenfalls als definierter Wert in die Simulation einbezogen wird und abhängig von der resultierenden Überstauhöhe die Parameter angepasst werden.



Tabelle 7-4: Parameterwerte des Grundzustands für die Sensitivitätsanalyse der Kiesbohrlöcher

Parameter	Grundzustand 1	Grundzustand 2	Einheit
$k_f$ -Wert Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	[m/s]
$k_f$ -Wert Filterkies	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	[m/s]
$k_f$ -Wert Aquifer	$7 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	[m/s]
Infiltrationsmenge	25	10	[m³/h]

Tabelle 7-5: Ergebnisse der Parametervariation bei gekoppelten Fließverhältnissen

Parameter	Startwert	Simulationswert	$\Delta$ Überstau	$\Delta$ Wasserstand
	[-]	[-]	[m]	[m]
$k_f$ -Wert Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s	$5,8 \cdot 10^{-3}$ m/s	-0,10	0,01
	$2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s	$1,45 \cdot 10^{-3}$ m/s	0,19	0,00
$k_f$ -Wert Filterkies	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$9,2 \cdot 10^{-2}$ m/s	-0,12	0,03
	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$2,3 \cdot 10^{-2}$ m/s	0,20	-0,04
$k_f$ -Wert Aquifer	$7 \cdot 10^{-4}$ m/s	$1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s	-0,30	-0,79
	$7 \cdot 10^{-4}$ m/s	$3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s	1,36	1,36
Grundwasser- stand	89,7 müNN	90,7 müNN	0,92	0,94
	89,7 müNN	88,7 müNN	-0,31	-0,88
Infiltrations- menge	25 m³/h	30 m³/h	0,37	0,29
	25 m³/h	20 m³/h	-0,34	-0,28

Bei der Variation der Parameterwerte werden die Durchlässigkeit der Filtersandschicht, der Filterkiesschicht und des Aquifers um die Hälfte verringert bzw. verdoppelt. Der hydraulische Gradient wird für das gesamte Modellgebiet variiert, indem der Grundwasserstand am Modellrand um einen Meter abgesenkt bzw. angehoben wird. Anschließend wird die Auswirkung der Infiltrationsmenge betrachtet, die vom Startwert 25 m³/h um 5 m³/h erhöht und verringert wird. In Tabelle 7-5 sind die Ergebnisse bei gekoppelten Strömungsverhältnissen und gleichbleibender Infiltrationsmenge dargestellt. Die Ergebnisse beziehen sich hier sowie bei den folgenden Ergebnistabellen auf das Kiesbohrloch A. Die gesamten Ergebnisse der Untersuchungen dieses Abschnitts finden sich in Anlage G wieder. Die Werte des Grundwasserstandes beziehen sich auf das zugewiesene Potential am Ostrand des Modellgebiets. Als Bezugspunkt für die Druckverhältnisse im Bohrloch sind die Ergebnisse der Differenz des Wasserstands an der mittleren Rammfilterlanze aufgelistet.

Aus den Ergebnissen dieser ersten Untersuchung bei gekoppelten Strömungsverhältnissen ist zu erkennen, dass mit den untersuchten Parametern eine Änderung der Durchlässigkeit der beiden Filterschichten einen geringeren Einfluss auf den resultierenden Überstau hat. Den größten Einfluss auf eine Erhöhung des Überstaus hat die Verringerung der Durchlässigkeit des Aquifers mit einer Differenz von 1,36 m. Auf eine Verringerung der Überstauhöhe wirken sich die Erhöhung der Durchlässigkeit des Aquifers, die Erhöhung des Grundwasserstandes und die Verringerung der Infiltrationsmenge in etwa gleich aus. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Ergebnisse für den resultierenden Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze: Eine Änderung der Durchlässigkeit der Filterschichten bei den gegebenen Bedingungen wirkt sich kaum auf die Druckverhältnisse im Inneren des Kiesbohrlochs aus. Diese werden maßgeblich durch die anderen drei Parameter bestimmt, wobei die Durchlässigkeit des Aquifers und der Grundwasserstand den größten Einfluss nehmen.

Tabelle 7-6: Ergebnisse der Parametervariation bei entkoppelten Fließverhältnissen

Parameter	Startwert	Simulationswert	$\Delta$ Überstau	$\Delta$ Wasserstand
	[-]	[-]	[m]	[m]
k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-4}$ m/s	$5,8 \cdot 10^{-4}$ m/s	0,74	0,00
	$2,9 \cdot 10^{-4}$ m/s	$1,45 \cdot 10^{-4}$ m/s	-0,43	0,00
k <sub>f</sub> -Wert Filterkies	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$9,2 \cdot 10^{-2}$ m/s	0,20	0,01
	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$2,3 \cdot 10^{-2}$ m/s	0,01	-0,02
k <sub>f</sub> -Wert Aquifer	$7 \cdot 10^{-4}$ m/s	$1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s	-0,02	-0,40
	$7 \cdot 10^{-4}$ m/s	$3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s	0,06	0,40
Grundwasser- stand	89,7 müNN	90,7 müNN	0,22	0,95
	89,7 müNN	88,7 müNN	0,21	-0,94
Infiltrations- menge	10 m <sup>3</sup> /h	15 m <sup>3</sup> /h	0,39	0,30
	10 m <sup>3</sup> /h	5 m <sup>3</sup> /h	-0,19	-0,31

In Tabelle 7-6 sind die Ergebnisse der Simulation bei entkoppelten Fließverhältnissen und gleichbleibender Infiltrationsmenge aufgelistet. Im Vergleich mit den Ergebnissen der vorherigen Simulationen liegt der Einfluss auf den Überstau und auf die Druckverhältnisse im Inneren des Kiesbohrlochs nun bei anderen Parametern. Aufgrund der entkoppelten Fließverhältnisse hat eine Veränderung der Durchlässigkeit des Filtersandes die größten Auswirkungen auf die Überstauhöhe. Der Grundwasserstand und die Infiltrationsmenge bestimmen zu einem gewissen Teil ebenfalls den Überstau, eine Veränderung der Durchlässigkeit des Aquifers führt hingegen kaum zu einem Unterschied. Wegen der entkoppelten Fließverhältnisse hat eine Änderung der Durchlässigkeit des Filtersandes keine Auswirkungen auf die Druckverhältnisse im Kiesbohrloch. Infolge der miteinander verbundenen Strömungsverhältnisse des Filterkiesbereichs und des Anstehenden hat eine Änderung des Grundwasserstands bei diesen Randbedingungen den größten Einfluss auf die Druckverhältnisse im Inneren des Kiesbohrlochs. Die Durchlässigkeit des Aquifers und die Infiltrationsmenge wirken sich ebenfalls auf den Wasserstand aus, jedoch geringer als der Grundwasserstand. Eine zu vernachlässigende Bedeutung hat eine Veränderung der Durchlässigkeit des Filterkieses.

Bei der folgenden Kalibrierung helfen die Ergebnisse dieser Untersuchung. Zur Erreichung der gemessenen Werte sind die Durchlässigkeit der Filterschichten und des Aquifers die veränderlichen Größen. Die Infiltrationsmenge, die Überstauhöhe und der Grundwasserstand liegen als gemessene Werte vor und sind bei der Kalibrierung unveränderlich. Mit den aus der Kalibrierung gewonnenen Werten kann anschließend eine Untersuchung der auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden grundwasserhydraulischen Parameter durchgeführt werden.

## 7.4 Kalibrierung und Validierung

Damit das erstellte Modell sowie die aus den Simulationen gewonnenen Ergebnisse belastbar sind, wird es mit aufgezeichneten Daten kalibriert und validiert. Dabei wird zunächst großräumig eine Kalibrierung anhand der simulierten Grundwassergleichen und der Gleichen aus den Richtwerten des Grundwasserbewirtschaftungsplans durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Kalibrierung im Nahbereich des Organs 6, bei der in erster Linie die Durchlässigkeitsbeiwerte der Filterschichten verändert werden. Um die aus der Kalibrierung gewonnenen Werte zu verifizieren, wird anschließend eine Validierung mit von der Kalibrierung unabhängigen Datensätzen durchgeführt.

### 7.4.1 Großräumige Kalibrierung

Die stationäre Strömungsberechnung in Spring beruht auf einer iterativen Berechnung, deren Grundlage eine Differentialgleichung durch Kopplung des Darcy-Gesetzes mit der Kontinuitätsbedingung darstellt (König et al, 2017, S. 284ff.). Bei der Berechnung der freien Grundwasseroberfläche wird die Strömungsgleichung als Druckgleichung berücksichtigt, wobei für jeden Netzknoten aus dem aktuellen Druck ein Sättigungsgrad und für jedes Element aus diesen Sättigungswerten der Knoten ein relativer Durchlässigkeitswert bestimmt wird. Diese Berechnung erfolgt iterativ. Um Oszillationen bei den Iterationsschritten zu vermeiden, wird dem relativen Durchlässigkeitswert ein Dämpfungsfaktor zugewiesen. Der Dämpfungsfaktor kann Werte zwischen null und eins annehmen, wobei bei einem Wert von null die Iteration nicht gedämpft wird. Voreingestellt für die einfache stationäre Berechnung ist ein Dämpfungsfaktor von 0,5 und die Anzahl von fünf Iterationsschritten. Die hohe Neubildungsrate im ungesättigten Bereich durch die Infiltration führt bei der Berechnung zu einem numerischen Problem in Form von oszillierenden Ergebnissen, wodurch die Iteration nicht konvergiert. Daher wurden die Werte für den Dämpfungsfaktor und die Anzahl der Iterationen angepasst, sodass die maximale Änderung des berechneten Wasserstands zur vorherigen Iteration im Millimeterbereich liegt und damit die Berechnungsergebnisse belastbar sind. Mit einem Dämpfungsfaktor von 0,2 wurden die besten Ergebnisse erzielt, wobei die Anzahl der Iterationsschritte abhängig von den Eingabeparametern schwankt und in einem Bereich von 10 - 30 liegt. Da für die Aufgabenstellung eine stationäre Modellierung ausreichend ist, wird das Modell auch stationär kalibriert. Hierbei sei zu erwähnen, dass aufgrund der stationären Kalibrierung unterschiedliche Parametereinstellungen zur Erreichung der gemessenen Werte möglich sind.

Als erster Schritt der Kalibrierung des Modells wird mit der großräumigen Kalibrierung begonnen, bei der das Modell im Ganzen betrachtet wird. Ziel hierbei ist es, durch eine Anpassung der Attributwerte, die aus dem großräumigen Modell der BGS UMWELT für das Hessische Ried übernommen wurden, und der selbst gewählten Werte eine Annäherung der berechneten Grundwassergleichen an die Gleichen zu bekommen, die sich aus den Richtwerten ergeben und die als Randbedingung genutzt werden. In Abbildung 7-19 auf der folgenden Seite sind die sich durch eine einfache stationäre Strömungsmodellierung ergebenden Grundwassergleichen (blau) sowie die Gleichen der Richtwerte (rot) dargestellt. Hierfür wurde den Infiltrationsorganen die Infiltrationsmenge zugewiesen, die auch für die Erstellung der Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplans berücksichtigt wurden. Dabei handelt es sich um die Grundinfiltration, die sich auf 2,5 Mio. m<sup>3</sup>/a für alle 12 Infiltrationsanlagen des Jägersburger Waldes beläuft. Diese Menge wurde gleichmäßig auf die Organe aufgeteilt, wodurch sich eine Infiltrationsmenge von etwa 42.000 m<sup>3</sup>/a bzw. 5 m<sup>3</sup>/h pro Kiesbohrloch ergibt. Da dem östlichen Rand der Wert der entsprechenden Grundwassergleiche von 89,5 müNN als Potential zugewiesen wurde, liegen diese beiden Gleichen auf einer Höhe. Für die beiden folgenden Gleichen mit den Werten 89,0 müNN und 88,5 müNN ist dies jedoch nicht der Fall, die Gleichen stimmen in ihrer Lage nicht überein. Dies gilt es durch eine Anpassung der Durchlässigkeit des Aquifers auszugleichen und eine gute Annäherung zu erreichen. In Abbildung 7-19 dargestellt sind ebenso drei Grundwassermessstellen, für die Richtwerte durch den Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried vorliegen und die in der unmittelbaren Nähe des Modellgebiets liegen. Die Messstelle im Modellgebiet weist einen Richtwert von 89,1 müNN auf, die westlich des Gebiets gelegene Messstelle einen Wert von 87,3 müNN und die südlich gelegene einen Wert von 89,3 müNN.

Ausschlaggebend für den Verlauf der Grundwassergleichen sind in erster Linie die Potentialwerte an den beiden Modellrändern und die Durchlässigkeit des Grundwasserkörpers. Der Wert der westlichen Randbedingung weist einen geringen Spielraum für die Kalibrierung auf, da der Wert des Potentials an dieser Stelle abgeschätzt wurde. Der Wert am anderen Rand ist unveränderlich. Demnach wird die großräumige Kalibrierung durch eine Anpassung der Durchlässigkeit des Grundwasserkörpers durchgeführt, wobei die Werte der Tonschichten nicht verändert werden. In Abbildung 7-19 weist der kleinere blaue Bereich einen  $k_f$ -Wert von  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s auf und der restliche Bereich einen Wert von  $7 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die Lage der Tonschichten sowie die Durchlässigkeitsbeiwerte des Aquifers auf Grundlage

des großräumigen Modells der BGS UMWELT für das Hessische Ried wurden bereits in Kapitel 7.2 näher erläutert.

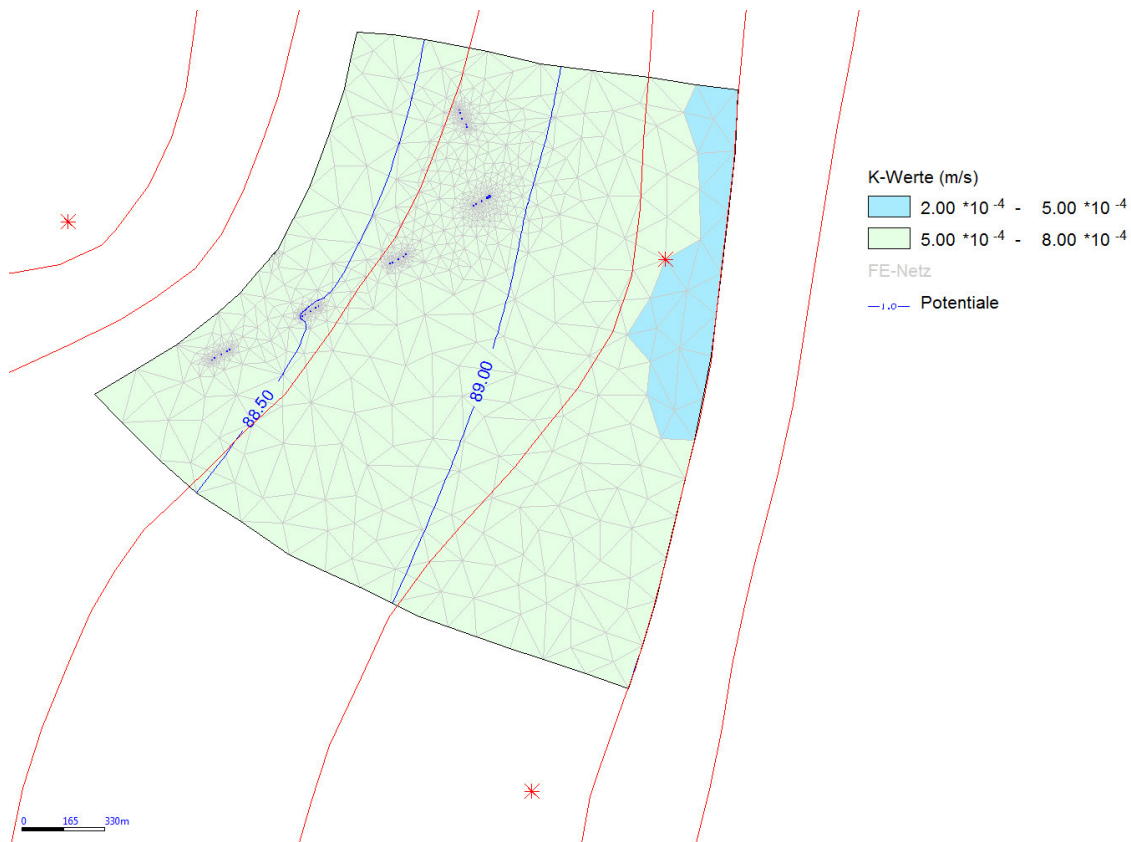


Abbildung 7-19: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Jägersburger Wald (1)

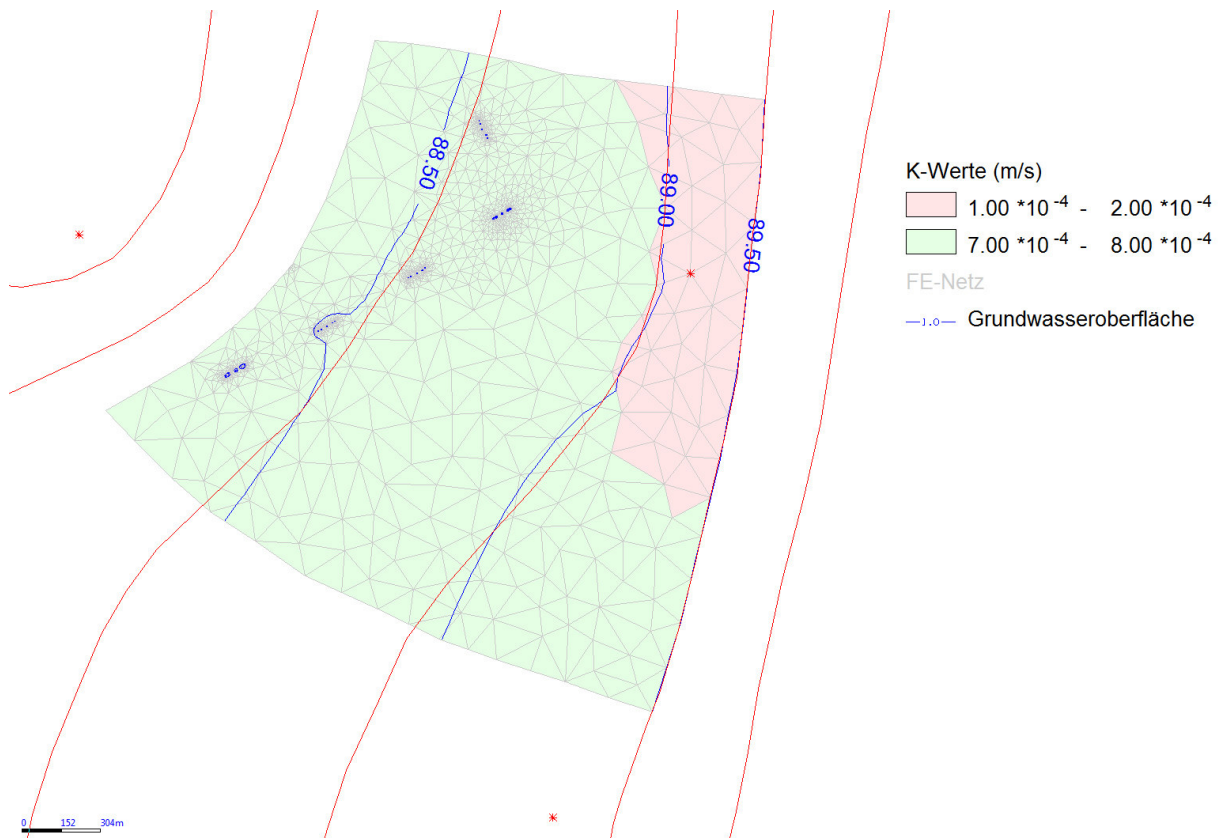


Abbildung 7-20: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Jägersburger Wald (2)

Die Werte der Durchlässigkeit des Grundwasserkörpers werden in einem angemessenen Wertebereich solange variiert, bis die berechneten Grundwassergleichen sich denen der Richtwerte möglichst gut annähern. In Abbildung 7-20 auf der vorherigen Seite ist das Ergebnis der großräumigen Kalibrierung für das Modellgebiet Jägersburger Wald dargestellt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird durch die Änderung der Durchlässigkeit die Lage der Grundwassergleichen deutlich verbessert, ohne dass die Werte zu stark verändert wurden. Zudem war bereits vor der Kalibrierung an der Stelle, an der die Werte angepasst wurden, ein Bereich mit geringerer Durchlässigkeit vorhanden, welcher sich im großräumigen Modell von BGS UMWELT des Hessischen Rieds noch weiter nach Osten erstreckt. Die durch die Modellabgrenzung geringere Auswirkung auf den Grundwasserkörper durch diesen Bereich wurde durch eine Anpassung der  $k_f$ -Werte ausgeglichen. Die Änderungen der Durchlässigkeit wurden dabei über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserkörpers, ausgenommen der Tonschichten, durchgeführt. Die Randbedingung der westlichen Abgrenzung von 88,17 mÜNN ist unverändert geblieben.

#### 7.4.2 Kalibrierung im Nahbereich

Nach der großräumigen Kalibrierung erfolgt die Kalibrierung im Nahbereich des Organs 6. Ein optimaler Datensatz für die Kalibrierung des Modells würde den Überstau im Kiesbohrloch und die Messung der Druckverhältnisse in allen drei Rammfilterlanzen bei unterschiedlichen Infiltrationsmengen für jedes einzelne Bohrloch beinhalten. Die zur Verfügung stehenden Datensätze entsprechen dem nicht, da für keinen Zeitraum für jedes Kiesbohrloch die drei Parameter Infiltrationsmenge, Überstau und Wasserstand in den Rammfilterlanzen gleichzeitig vorliegen. Zudem liegen die Infiltrationsmengen in einem mittleren Wertebereich. Es werden zu keinem Zeitpunkt vergleichsweise hohe Mengen an Wasser infiltriert, wodurch eine Kalibrierung zu verschiedenen Belastungsszenarien möglich wäre. Da unter anderem auf Grund des zeitlichen Aufwands kein detaillierter Infiltrationsversuch mit entsprechender Datenaufnahme möglich ist, wird mit den vorhandenen Daten gearbeitet.

In Tabelle 7-7 sind die für die Kalibrierung des Modells in Frage kommenden Datensätze aufgelistet mit der Angabe, in welchem Zeitraum für welches Bohrloch welche Daten vorhanden sind. Für die stationäre Berechnung müssen Datenwerte ausgewählt werden, deren zeitlicher Verlauf in diesem Bereich möglichst stationär ist. Abhängig vom Datum der gewählten Datensätze, müssen die Randbedingungen in Form des Grundwasserstandes sowie die Infiltrationsmenge an den anderen Organen entsprechend angepasst werden.

Tabelle 7-7: Datensätze für die Kalibrierung und Validierung des Organs 6 im Jägersburger Wald

Nummerierung	Zeitraum	Kiesbohrloch	Infiltrationsmenge	Messung Überstau	Messung in RFL
1	08.05.2014 - 18.06.2014	A-E	ja	ja	nein
2	01.01.2015 - 23.01.2015	A, B, D und E	ja	ja	nein
3	01.04.2015 - 06.10.2015	A-E	ja	ja	nein
4	06.10.2015	A, B und D	ja	ja	ja
5	01.01.2016 - 31.12.2016	A, B und D	ja	nein	ja
		E	ja	ja	nein
5	01.01.2016 - 30.03.2016	C	ja	ja	nein
5	07.12.2016 - 31.12.2016	C	ja	ja	nein
6	21.04.2017 - 31.12.2017	B, D und E	ja	nein	ja
7	01.01.2018 - 18.04.2018	B, D und E	ja	nein	ja



Die Infiltration wird in Spring modelliert, indem einem Knoten mit dem Attributwert KNOT eine Zuflussmenge zugewiesen wird. Mit dem Attributwert GLEI wird für die entsprechenden Knoten ein gleiches Potential definiert, sodass im Einstaubereich ein gleichmäßiger Überstau erzeugt wird. Die Höhe des Überstaus ist dabei von verschiedenen Parametern abhängig, unter anderem der Infiltrationsmenge, dem Grundwasserstand sowie den  $k_f$ -Werten für den Filtersand, Filterkies und das Anstehende. Da die Infiltrationsmenge und der Grundwasserstand gegeben sind, werden die  $k_f$ -Werte während der Kalibrierung verändert, um den entsprechenden Wert für den Überstau zu erreichen. Während der Parametervariation in Kapitel 7.3 zeigte sich, dass bei entkoppelten Strömungsverhältnissen eine Änderung der Durchlässigkeit des Filtersandes deutlich sensibler im Hinblick auf den Überstau ist als eine Änderung der anderen Parameter. Da mit dem gewählten Datensatz entkoppelte Verhältnisse resultieren, wird die Durchlässigkeit des Anstehenden sowie die für den Filterkies während der Kalibrierung unverändert gelassen und zur Erreichung des Überstaus nur die Durchlässigkeit des Filtersandes verändert. Für den Filtersand wird vorerst mit einem Wert von  $2,9 \cdot 10^{-3}$  m/s begonnen, welcher anschließend in Abhängigkeit vom Simulationsergebnis abgeändert wird. Dies erfolgt solange, bis das gewünschte Ergebnis erreicht ist. Aufgrund der unterschiedlichen Werte für die Infiltrationsmenge und den Überstau ergeben sich in jedem Kiesbohrloch andere Durchlässigkeitsbeiwerte für den Filtersand, wobei die Werte im Bereich von  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s liegen. Die genauen Werte sind in der folgenden Tabelle 7-8 aufgelistet. Die Durchlässigkeit des Filtersandes muss zur Erreichung des gemessenen Überstaus deutlich reduziert werden. Aufgrund der sehr geringen Durchlässigkeit des Filtersandes liegen keine zusammenhängenden Strömungsverhältnisse vor, sondern zwei voneinander hydraulisch entkoppelte Systeme. Dadurch sind die Druckverhältnisse voneinander entkoppelt und die Infiltrationsleistung wird ausschließlich von der Durchströmung der Filtersandschicht bestimmt.

Tabelle 7-8: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer stationäre Strömungssimulation (Datensatz 08.05.2015)

Kiesbohrloch	Überstau	Infiltrations- menge	$k_f$ -Wert Filtersand	$k_f$ -Wert Filterkies
	[m]	[m³/h]	[m/s]	[m/s]
A	1,25	8,0	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
B	1,34	8,4	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
C	1,35	11,0	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
D	1,39	9,6	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
E	1,39	8,7	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$

Um die Kalibrierungsergebnisse im Hinblick auf die verringerten  $k_f$ -Werte des Filtersandes zu überprüfen, wird ein zweiter Datensatz gewählt. Hierbei handelt es sich um Daten von Anfang Oktober 2015. In diesem Zeitraum überschneiden sich zwei Datenreihen, sodass für die Kiesbohrlöcher A, B und D Werte für den gemessenen Überstau und für den Wasserstand in der mittleren Rammfilterlanze vorliegen. An den anderen beiden Bohrlöchern stehen nur Werte für den Überstau zur Verfügung. Die Infiltrationsmenge ist an allen Bohrlöchern bekannt. In Tabelle 7-9 auf der folgenden Seite sind die Ergebnisse dieser Kalibrierung aufgelistet. Die Werte für die Durchlässigkeit der Filtersandschicht liegen im Bereich der vorherigen Kalibrierung. Um diese Werte bzw. den Überstauwert jedoch zu erreichen, muss die Durchlässigkeit des Anstehenden von  $7 \cdot 10^{-4}$  m/s auf  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s verringert werden. Hinzu kommt, dass die Werte für den gemessenen Wasserstand in den Rammfilterlanzen nicht erreicht werden. In der Lanze bei Bohrloch A liegt der berechnete Wert etwa 0,3 m unter dem gemessenen Wert, bei B 0,1 m und bei C liegt der Wert rund 0,5 m höher.

Im Hinblick auf die Ergebnisse der Parametervariation haben Grundwasserstand, Infiltrationsmenge und Durchlässigkeit des Anstehenden einen maßgebenden Einfluss auf die Druckverhältnisse im Inneren des Kiesbohrlochs. Da der Grundwasserstand sowie die Infiltrationsmenge feste Größen sind, bleibt die Durchlässigkeit des Anstehenden als mögliche Variable für die Kalibrierung und Erreichung der Druckverhältnisse im Inneren. Die Problematik hierbei ist jedoch, dass zum Erreichen des

Wasserstands an Bohrloch A die Durchlässigkeit im Anstehenden verringert, zum Erreichen des Wasserstands bei D jedoch erhöht werden müsste. Ein derartiger Unterschied der Durchlässigkeit eines Grundwasserkörpers in diesem kleinen Bereich ist unrealistisch.

Tabelle 7-9: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer stationäre Strömungssimulation (Datensatz 06.10.2015)

Kiesbohrloch	Überstau	Infiltrations- menge	k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	k <sub>f</sub> -Wert Filterkies
	[m]	[m³/h]	[m/s]	[m/s]
A	1,37	10,0	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
B	1,40	10,5	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
C	1,48	10,6	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
D	1,47	11,3	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
E	1,44	10,2	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$

Eine weitere Problematik bei der Kalibrierung durch eine einfache stationäre Strömungsberechnung stellt die Temperatur dar. In Spring ist hierbei die Temperatur auf 20 °C voreingestellt (KÖNIG et al, 2017, S. 331). Bei den beiden gewählten Datensätzen liegt die Temperatur des Infiltrationswassers jedoch nicht bei 20 °C. Das Grundwasser in Deutschland hat in der Regel eine Temperatur von 10 °C. Da die Temperatur des Wassers einen direkten Einfluss auf dessen Eigenschaften hat und damit auch auf die Infiltrationsleistung, wird die Kalibrierung an dieser Stelle mit einer Wärmetransportberechnung in Spring fortgesetzt, die ebenfalls stationär durchgeführt wird. In Spring wird der Energietransport wie eine Stofftransportrechnung durchgeführt, nur dass hierbei die Temperatur die „Konzentration“ darstellt. Daher müssen auch die entsprechenden Attributwerte vergeben werden. Dazu zählt die Anfangstemperatur (AKON), die für alle Knoten im Modell mit 10 °C definiert wird, eine Temperatur (KONZ), die für die Grundwasserneubildung festgelegt werden muss und im Modell ebenfalls mit 10 °C belegt wird sowie die Zuweisung einer konstant bleibenden Temperatur als Randbedingung (1KON) für alle Zuflüsse in das Modell. Da vom Ostrand das Grundwasser dem Modell zuströmt, wird für diesen als Randbedingung eine Temperatur von 10 °C definiert, dadurch hat das nachströmende Wasser immer 10 °C. Für die Knoten, für die eine Infiltrationsmenge hinterlegt ist, muss ebenfalls mit 1KON eine Temperatur dem Infiltrationswasser zugewiesen werden. Nach Abbildung 7-6 auf Seite 38 liegt die Temperatur des Infiltrationswassers im April etwa bei 12 °C und im Oktober bei 18 °C.

Für die Wärmetransportrechnung werden in Bezug auf die Temperatur die dynamische Viskosität und die Dichte des Wassers berechnet. Dabei werden die entsprechenden Gleichungen, die in Kapitel 2.1 erläutert wurden, verwendet. Zusätzlich müssen für die Berechnung sowohl dem Wasser als auch der Matrix wärmespezifische Eigenschaften zugewiesen werden. Dazu gehören die spezifische Wärmekapazität sowie die Wärmeleitfähigkeit. Für die Berechnung werden die im Kapitel 2.2 aufgezeigten Werte übernommen. Mit diesen Werten wird der Wärmetransport berechnet und die Kalibrierung des Modells fortgesetzt. In Abbildung 7-21 auf der folgenden Seite ist eine Sicht auf das Modellgebiet gegeben. Die unterschiedlichen Temperaturbereiche, die sich aufgrund der Infiltration von 18 °C warmen Wasser ergeben, sind farblich dargestellt. Die Wärmeausbreitung ist hierbei gut zu erkennen. Diese erfolgt dabei auch entgegen der Fließrichtung, wobei der Einflussbereich abhängig von der Infiltrationsmenge und der Temperatur des Infiltrationswassers ist. Bei mittleren Infiltrationsmengen und einer Temperatur von 18 °C ist noch etwa 250 m vom Infiltrationsorgan 6 entgegen der Strömungsrichtung des Grundwassers mit einer Temperaturerhöhung von 1 °C zu rechnen.

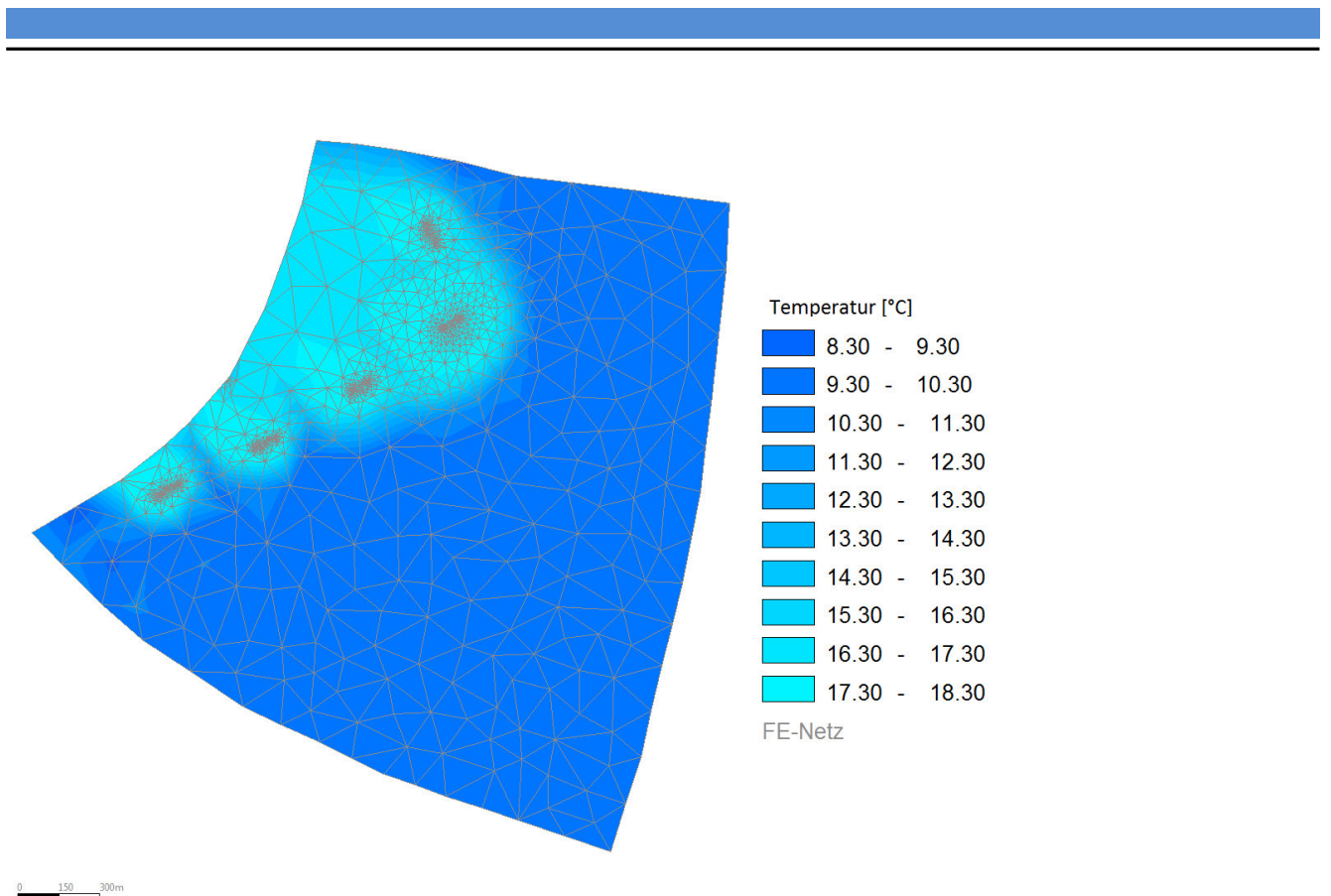


Abbildung 7-21: Wärmeausbreitung bei einer Temperatur von 18 °C des Infiltrationswassers

Tabelle 7-10: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer Wärmetransportrechnung (Datensatz 08.05.2015)

Kiesbohrloch	Überstau	Infiltrations- menge	k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	k <sub>f</sub> -Wert Filterkies
	[m]	[m³/h]	[m/s]	[m/s]
A	1,25	8,0	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
B	1,34	8,4	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
C	1,35	11,0	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
D	1,39	9,6	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
E	1,39	8,7	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$

Tabelle 7-11: Ergebnisse der Kalibrierung mit einer Wärmetransportrechnung (Datensatz 06.10.2015)

Kiesbohrloch	Überstau	Infiltrations- menge	k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	k <sub>f</sub> -Wert Filterkies
	[m]	[m³/h]	[m/s]	[m/s]
A	1,37	10,0	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
B	1,40	10,5	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
C	1,48	10,6	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
D	1,47	11,3	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
E	1,44	10,2	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$

In Tabelle 7-10 und Tabelle 7-11 sind die Ergebnisse der Kalibrierung über eine Wärmetransportrechnung für die beiden Datensätze aufgelistet. Auf den ersten Blick scheint es keine großen Abweichungen zwischen den beiden unterschiedlichen Strömungsberechnungen zu geben. Jedoch wurde die Durchlässigkeit des Anstehenden für beide Datensätze bei der

Wärmetransportrechnung auf  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  gesetzt. Der Startwert von  $7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ , der aus dem großräumigen Modell von BGS UMWELT übernommen wurde, basiert auf der Datengrundlage von Pumpversuchen. Da die Brunnen, an denen diese Versuche durchgeführt wurden, im unteren Bereich des Aquifers verfiltert sind, spiegelt der resultierende Wert die dortigen Verhältnisse wider. Jedoch ist die Durchlässigkeit im oberen Bereich aufgrund der natürlichen Schichtung eines Grundwasserleiters meist geringer. Ein Wert von  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  ist daher als plausibel einzuschätzen.

Der größte Unterschied in den Ergebnissen der beiden Strömungsberechnungen liegt jedoch bei den resultierenden Strömungsverhältnissen. Wie bereits erwähnt, liegen bei der einfachen stationären Strömungsberechnung entkoppelte Strömungs- und Druckverhältnisse für die gewählten Datensätze vor. Bei der stationären Wärmetransportrechnung herrschen hingegen gekoppelte Verhältnisse, sodass die Infiltrationsmenge nicht maßgeblich von der Durchströmung der Filtersandschicht bestimmt wird. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der beiden Datensätze für Mai und Oktober mit einer Wärmetransportrechnung zeigt, dass diese, abgesehen der Werte für die Durchlässigkeit der Filtersandschicht, identisch sind. Auf diesen Ergebnissen basierend wird die Durchlässigkeit der Filtersandschicht als Mittel aus den beiden Werten der Datensätze festgelegt. In Tabelle 7-12 sind die entsprechenden Werte aufgelistet.

Tabelle 7-12: Durchlässigkeitsbeiwerte resultierend aus der Kalibrierung

Kiesbohrloch	k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	k <sub>f</sub> -Wert Filterkies	k <sub>f</sub> -Wert Anstehendes
	[m/s]	[m/s]	[m/s]
A	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
B	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
C	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
D	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
E	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$

Aufgrund der Änderung der Durchlässigkeit des Grundwasserkörpers muss im Nachhinein die unter Punkt 7.4.1 durchgeführte großräumige Kalibrierung angepasst werden. Dies wird erreicht, indem die Durchlässigkeit des Bereichs, die zuvor bei  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  gelegen hat auf  $7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  reduziert wird.

### 7.4.3 Validierung

Durch die Validierung werden die gewonnenen Modellparameter mit einem von der Kalibrierung unabhängigen Datensatz verifiziert. Dafür wird ebenso eine stationäre Strömungsberechnung über einen Wärmetransport durchgeführt, um die Temperatur des Infiltrationswassers zum Zeitpunkt der Datenaufnahme zu berücksichtigen. Für die Validierung werden zwei Datensätze gewählt. Zunächst werden mit den Daten vom 4. Juli 2015 die kalibrierten Werte überprüft, bei denen für alle Kiesbohrlöcher die Infiltrationsmengen und Überstauhöhen vorliegen. Anschließend erfolgt eine Simulation mit einem Datensatz, bei dem für die Kiesbohrlöcher B, D und E Messwerte aus den mittleren Rammfilterlanzen vorliegen. Hierdurch können die Druckverhältnisse im Inneren des Kiesbohrlochs verifiziert werden. Dies wird mit den Daten vom 26. August 2017 durchgeführt.

In **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** und Tabelle 7-14 auf der folgenden Seite sind die gemessenen sowie die simulierten Werte des Überstaus und des Wasserstands auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze aufgelistet. Es zeigt sich, dass mit den kalibrierten Werten auch die Verhältnisse der für die Validierung gewählten Zeitpunkte gut abgebildet werden. Diese Werte werden daher im Folgenden für die Untersuchung der maßgebenden grundwasserhydraulischen Parameter verwendet. Zu erwähnen sei hierbei jedoch, dass bei einer stationären Kalibrierung und Validierung verschiedene Parameterzusammensetzungen zur Erreichung der gemessenen Werte führen können. Durch einen Infiltrationsversuch am Organ 6 mit entsprechender Datenaufnahme der

Infiltrationsmenge, der Überstauhöhe und des Wasserstands in allen drei Rammfilterlanzen an jedem Bohrloch können die hier resultierenden Durchlässigkeitsbeiwerte zusätzlich abgesichert oder ggf. optimiert werden.

Tabelle 7-13: Ergebnisse der Validierung (Datensatz 04.07.2015)

Kiesbohrloch	Infiltrations- menge	Überstau gemessen	Überstau simuliert
	[m³/h]	[m]	[m]
A	9,4	0,74	0,96
B	10,0	0,87	0,89
C	12,5	1,17	1,10
D	11,2	1,16	1,01
E	10,2	1,09	1,00

Tabelle 7-14: Ergebnisse der Validierung (Datensatz 26.08.2017)

Kiesbohrloch	Infiltrations- menge	Wasserstand gemessen	Wasserstand simuliert
	[m³/h]	[m]	[m]
A	8,7	-	88,74
B	9,2	89,15	88,83
C	9,1	-	88,77
D	7,5	88,72	88,69
E	8,0	88,66	88,66

## 7.5 Identifizierung und Quantifizierung der auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden Parameter

In diesem Kapitel werden die für die Infiltrationsleistung maßgebenden grundwasserhydraulischen Parameter identifiziert und quantifiziert. Dabei werden ausgehend von einem Ausgangszustand durch Simulationen einzelne Parameter variiert und deren Auswirkung auf die Infiltrationsmenge dokumentiert und eingeschätzt.

### 7.5.1 Durchlässigkeit der Filterschicht

Die Durchlässigkeit der Filterschichten in den Kiesbohrlöchern hat einen direkten Einfluss auf die Infiltrationsleistung. Bereits in Kapitel 7.3 wurde deutlich, dass bei entkoppelten Druckverhältnissen die Infiltrationsleistung ausschließlich durch die Durchströmung der Filtersandschicht bestimmt wird. Dabei kann bereits mit den aus der Kalibrierung resultierenden Durchlässigkeitsbeiwerten für die Filtersandschicht und unter Berücksichtigung der Temperatur des Infiltrationswassers eine Entkopplung der Strömungsverhältnisse stattfinden. Dies zeigte die Validierung mit den verwendeten Datensätzen, während mit den Datensätzen der Kalibrierung für alle Kiesbohrlöcher des Organs 6 gekoppelte Verhältnisse vorlagen. Aufgrund der deutlich reduzierten Infiltrationsleistung ist im Betrieb eine Entkopplung unerwünscht.

Eine Kolmation im Bereich der Filtersandschicht kann durch eine Verringerung der Durchlässigkeit zu einem Ablösen der Strömung führen. Ausgehend von den verifizierten Durchlässigkeitsbeiwerten der Kalibrierung wird mit einer Simulation die Durchlässigkeit sukzessive verringert. Für den Grundwasserstand werden mittlere Werte angesetzt. Alle Randbedingungen bleiben unverändert, zudem wird an den anderen sich im Modellgebiet befindenden Organen kein Wasser infiltriert, damit



die Auswirkungen der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf die Infiltrationsleistung nicht durch andere Parameter verfälscht werden. Die Überstauhöhe wird auf 1 m festgelegt, sodass als Simulationsergebnis die Infiltrationsmenge resultiert. Da die Temperatur in diesem Fall als Randbedingung ebenfalls konstant bleibt, ist hierbei keine Wärmetransportrechnung notwendig, sodass eine einfache stationäre Strömungssimulation durchgeführt wird. In der folgenden Abbildung 7-22 sowie in Tabelle H-2 in Anlage H sind die Ergebnisse dieser Untersuchung dargestellt.

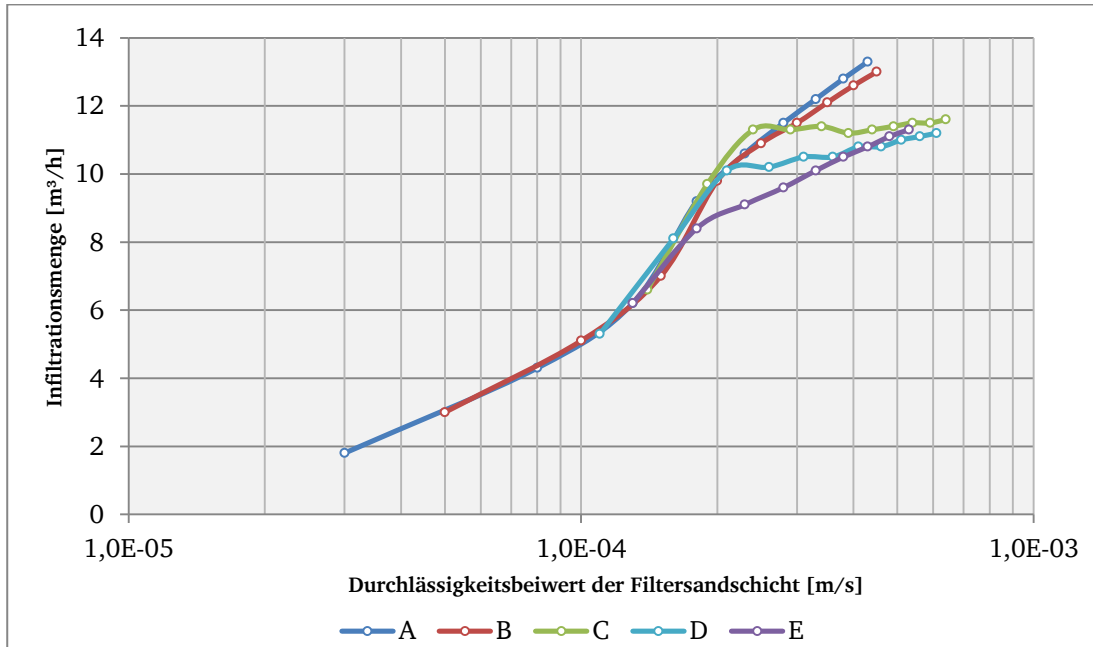


Abbildung 7-22: Auswirkungen des Durchlässigkeitsbeiwertes der Filtersandschicht auf die Infiltrationsmenge

Zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert der Filtersandschicht und der resultierenden Infiltrationsmenge besteht eine annähernd lineare Beziehung. In dem oben stehenden Diagramm sind die Daten jedoch zur besseren Übersicht einfach logarithmisch aufgetragen. Bei einem Durchlässigkeitsbeiwert von unter  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s liegen entkoppelte Strömungsverhältnisse vor, wodurch die Infiltrationsmenge ausschließlich durch die Durchströmung der Filtersandschicht abhängig ist. Dadurch beeinflusst die Durchlässigkeit des Filtersandes bei entkoppelten Verhältnissen die Infiltrationsmenge stärker, als bei gekoppelten Verhältnissen. Bei gekoppelten Strömungsverhältnissen wirkt sich der größere hydraulische Gradient an den Kiesbohrlöchern A und B aus, sodass an diesen bei gleichem Durchlässigkeitsbeiwert der Filtersandschicht eine höhere Infiltrationsmenge resultiert, als bei den anderen Kiesbohrlöchern. Eine Kolmation der Filtersandschicht, die sich auf die Durchlässigkeit dieser Schicht auswirkt, hat demnach einen direkten Einfluss auf die Infiltrationsleistung. Dieser Einfluss wird noch verstärkt, sobald durch die Kolmation zwei voneinander entkoppelte Strömungssysteme vorliegen. Bei gekoppelten Verhältnissen reduziert sich die Infiltrationsmenge am Kiesbohrloch A bei Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwerts von  $4,3 \cdot 10^{-4}$  m/s auf  $3,3 \cdot 10^{-4}$  m/s um 9 %. Wird die Durchlässigkeit um den gleichen Wert bei entkoppelten Strömungsverhältnissen von  $1,3 \cdot 10^{-4}$  m/s auf  $3,0 \cdot 10^{-5}$  m/s verringert, resultiert eine um etwa 70 % geringere Infiltrationsmenge. Im Hinblick auf die Gewährleistung eines optimalen Infiltrationsbetriebs sollte daher vor einer Entkopplung der Strömungsverhältnisse die Filtersandschicht ausgetauscht werden.

Während des Betriebs der Kiesbohrlöcher zeigt sich, dass die Kolmation im oberen Bereich der Filtersandschicht stattfindet. Anschließend wird untersucht, inwieweit sich eine Entfernung dieser Schicht auf die Infiltrationsleistung auswirkt. Hierfür wird zunächst die Filtersandschicht durch eine Auffüllung des vorhandenen Filterkieses mit einem Korndurchmesser von 2,0 – 3,15 mm ersetzt. In einer zweiten Simulation wird die Körnung des Filterkieses zu 3,15 – 5,6 mm vergrößert. Der für diesen Kies verwendete Durchlässigkeitsbeiwert wurde über die Gleichung nach Hazen bestimmt, wobei wie schon zuvor der minimal mögliche Wert angenommen wird.

Tabelle 7-15: Resultierende Infiltrationsmenge bei verschiedener Filterschichtabfolge

kf-Wert Filtersand	kf-Wert Filterkies	Überstau	Infiltrationsmenge
[m/s]	[m/s]	[m]	[m³/h]
$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,0	11,2
-	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,0	20,8
-	$1,2 \cdot 10^{-1}$	1,0	22,0

In der oben stehenden Tabelle 7-15 sind die Ergebnisse der Untersuchung für das Kiesbohrloch A des Organs 6 dargestellt. Eine ausführliche Tabelle mit den Ergebnissen aller Bohrlöcher findet sich in Anlage H mit Tabelle H-1 wieder. Durch eine Entfernung der Filtersandschicht bei gleichbleibenden Randbedingungen wird eine um etwa 45 % höhere Infiltrationsmenge erreicht. Die Verwendung eines größeren Filterkieses wirkt sich ebenfalls positiv auf die Infiltrationsmenge aus, jedoch nicht in der gleichen Größenordnung wie zuvor.

### 7.5.2 Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit im Kiesbohrloch hängt von der Infiltrationsmenge und der Körnung bzw. der effektiven Porosität des jeweiligen Mediums ab (s. Kapitel 2.1). Bei einer Infiltrationsmenge  $Q$  von  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  liegt eine Filtergeschwindigkeit  $v_f$  von  $5,66 \text{ m/s}$  vor. Mit einer effektiven Porosität  $n_{\text{eff},S}$  für Sand von 0,2 kann damit die Abstandsgeschwindigkeit  $v_{a,S}$  im Filtersand bestimmt werden. Es ergibt sich somit eine Geschwindigkeit von  $28,3 \text{ m/h}$  im Filtersand, im Filterkies liegt mit  $n_{\text{eff},K}$  von 0,3 die Geschwindigkeit bei  $18,9 \text{ m/h}$ . In Tabelle 7-16 sind die resultierenden Geschwindigkeiten für verschiedene Infiltrationsmengen aufgelistet.

$$v_f = \frac{Q}{A} = \frac{10 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\pi \cdot 0,75^2 \text{ m}^2} = 5,66 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad (7.1)$$

$$v_{a,S} = \frac{v_f}{n_{\text{eff},S}} = \frac{5,66 \frac{\text{m}}{\text{h}}}{0,2} = 28,3 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad (7.2)$$

$$v_{a,K} = \frac{v_f}{n_{\text{eff},K}} = \frac{5,66 \frac{\text{m}}{\text{h}}}{0,3} = 18,9 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad (7.3)$$

Tabelle 7-16: Resultierende Fließgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Infiltrationsmengen

Q	$v_f$	$v_{a,S}$	$v_{a,K}$
[m³/h]	[m/h]	[m/h]	[m/h]
5	2,83	14,1	9,4
10	5,66	28,3	18,9
15	8,49	42,4	28,3
20	11,32	56,6	37,7
25	14,15	70,7	47,2
30	16,98	84,9	56,6

In Anlage H sind in Tabelle H-3 für verschiedene Infiltrationsmengen und drei beispielhafte Konzentrationen an Eisen und Mangan im Infiltrationswasser die resultierenden Frachten pro Jahr aufgelistet. Bei einer Infiltrationsmenge von 15 m<sup>3</sup>/h und einer Eisenkonzentration von 0,02 mg/l wird eine jährliche Fracht von etwa 2.600 kg erreicht. Trotz der geringen Konzentrationen an Eisen und Mangan im Infiltrationswasser, deren Werte unterhalb der Richtwerte nach TrinkwV 2001 liegen, resultieren somit für die Ansiedlung von Mikroorganismen und die Bildung eines Biofilms ausreichende Frachten.

Die mittlere Infiltrationsmenge am Organ 6 im Jägersburger Wald liegt bei 32.000 m<sup>3</sup>/Monat und in den letzten fünf Jahren (2013 - 2018) wird eine maximale Menge von etwa 45.000 m<sup>3</sup>/Monat erreicht (s. Abbildung 7-2 S. 34). Bei 30 Tagen pro Monat und gleichmäßiger Aufteilung der Menge auf die fünf Kiesbohrlöcher ergibt sich somit eine mittlere Infiltrationsmenge von etwa 9 m<sup>3</sup>/h und eine maximale von 12,5 m<sup>3</sup>/h. Nach einer Strömungsberechnung mit Spring können die Fließrichtung sowie die Fließgeschwindigkeiten im Verhältnis zueinander mittels eines Schlierenbilds dargestellt werden. Zwei solcher Bilder sind mit Abbildung 7-23 gegeben. Deutlich zu erkennen sind hierbei die vertikal orientierte Fließrichtung im Inneren des Kiesbohrlochs und die bis zur Sohle horizontal verlaufende Fließrichtung im Anstehenden. Ebenso ersichtlich ist, dass bei der höheren Infiltrationsmenge größere Fließgeschwindigkeiten erreicht werden. Jedoch bietet die Darstellung als Schlierenbild keine Möglichkeit einer Skalierung der Geschwindigkeit.

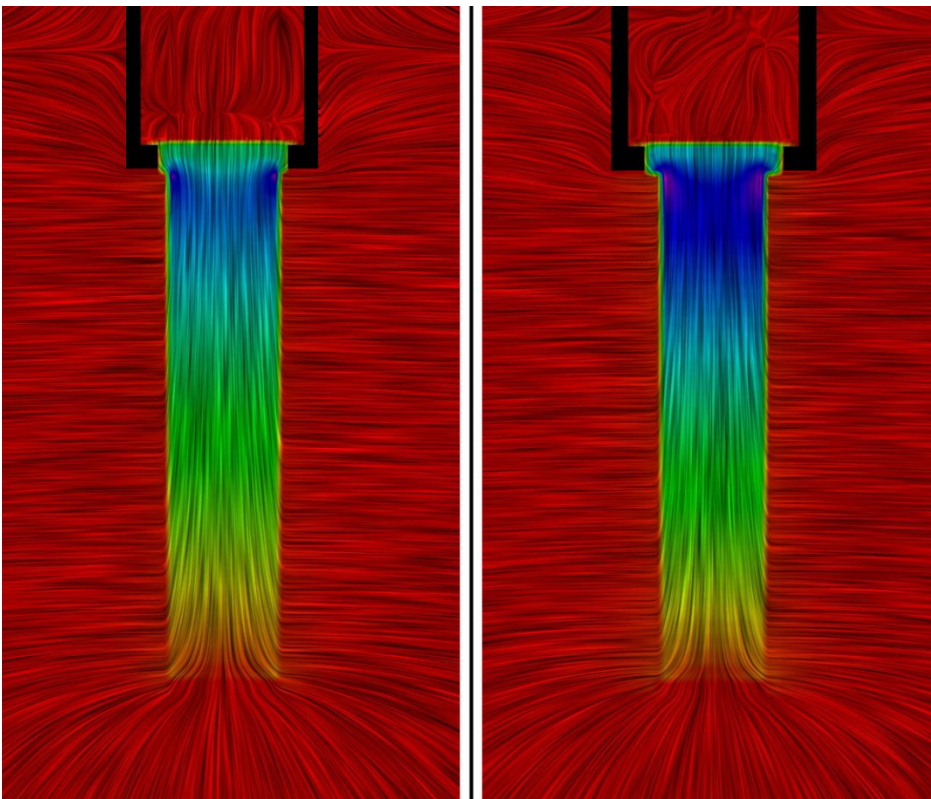


Abbildung 7-23: Darstellung der Fließrichtung als Schlierenbild bei einer Infiltrationsmenge von 9 m<sup>3</sup>/h (links) und 13 m<sup>3</sup>/h (rechts)

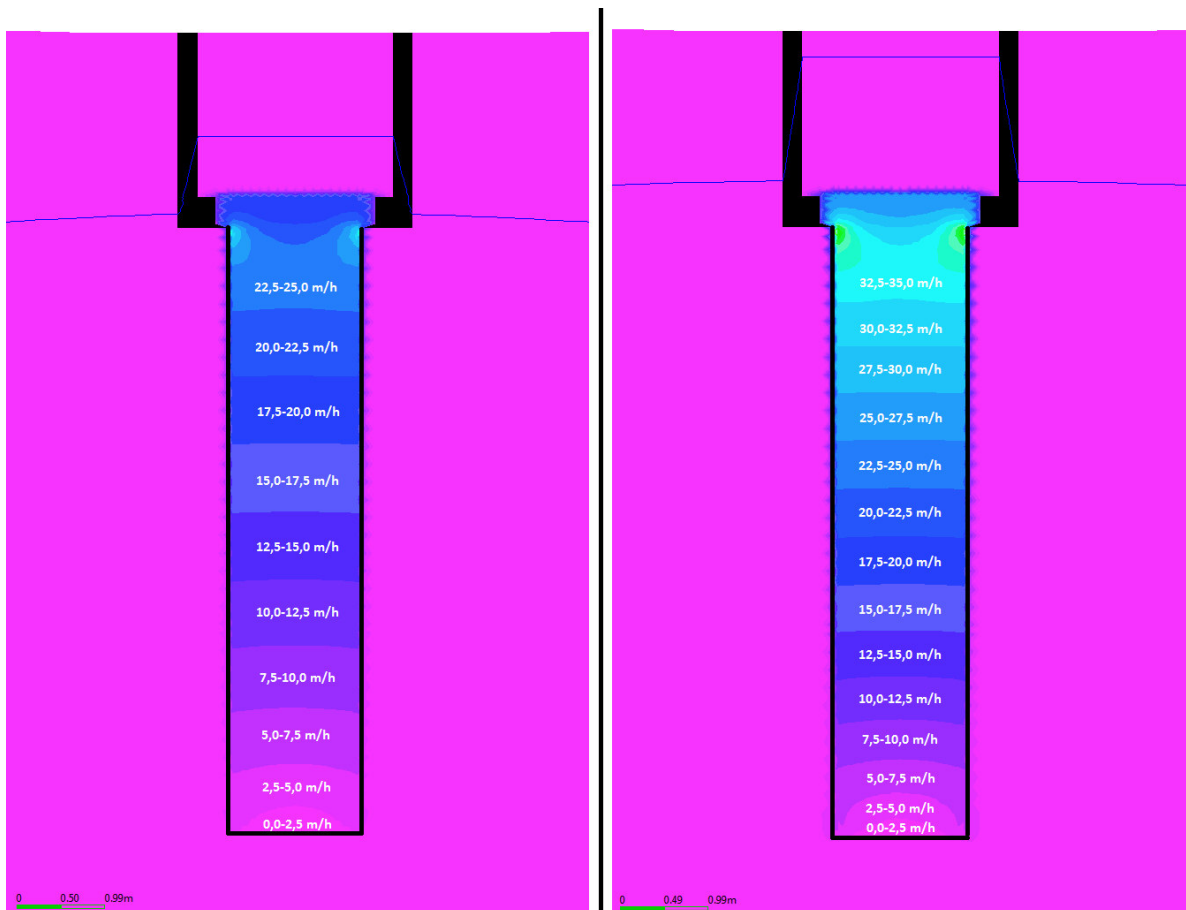


Abbildung 7-24: Resultierende Abstandsgeschwindigkeiten bei einer Infiltrationsmenge von 9 m³/h (links) und 13 m³/h (rechts)

Bei einer Strömungssimulation in Spring wird ebenfalls die Abstandsgeschwindigkeit in jedem Finite-Element berechnet. Zur Analyse der im Bohrloch anzutreffenden Fließgeschwindigkeiten werden zwei Simulationen durchgeführt, zum einen mit einer Infiltrationsmenge von 9 m³/h und zum anderen mit 13 m³/h, um die resultierenden Geschwindigkeiten bei mittleren und maximalen Infiltrationsmengen abbilden zu können. In Abbildung 7-24 sind die durch die Simulation berechneten Abstandsgeschwindigkeiten im Kiesbohrloch farblich dargestellt. Die höchste Geschwindigkeit wird im Bereich der nach dem Fundamenttring folgenden Querschnittsverringerung erreicht. Bei einer mittleren Infiltrationsmenge werden hier bis zu 35 m³/h erreicht und bei einer maximalen Infiltrationsmenge bis zu 45 m³/h. Abgesehen von diesen Extremwerten liegen bei der Durchströmung im Kiesbohrloch Abstandsgeschwindigkeiten von bis zu 25 m³/h bzw. 35 m³/h vor. Die Abstandsgeschwindigkeit nimmt in der Filterkiesschicht mit zunehmender Tiefe ab und liegt an der Sohle nur noch bei maximal 2,5 m/h. Beim Übergang in das Anstehende reduziert sich die Geschwindigkeit auf kurzer Strecke und liegt hier ebenfalls maximal bei 2,5 m/h. Inwieweit die im Kiesbohrloch auftretenden Fließgeschwindigkeiten von denen im Sickerschlitzgraben abweichen, wird in Kapitel 8.5.2 erläutert.

### 7.5.3 Temperatur des Infiltrationswassers

Aufgrund der Herkunft des Wassers für die künstliche Grundwasseranreicherung im Hessischen Ried schwanken die Temperaturen des Infiltrationswassers im Laufe des Jahres. Der Bereich der Temperaturschwankung liegt dabei bei etwa 6 – 26 °C. Aufgrund der direkten Abhängigkeit der dynamischen Viskosität und der Dichte des Wassers, variieren diese mit der Temperatur. In Tabelle 7-17 auf der folgenden Seite sind für den Temperaturbereich des Infiltrationswassers die resultierenden Werte für die dynamische Viskosität und die Dichte des Wassers aufgetragen. Für die Berechnung beider Parameter wurden die beim Modellierungsprogramm Spring verwendeten

Gleichungen herangezogen (s. Kapitel 2.2). Für den betrachteten Temperaturbereich nehmen die Viskosität und die Dichte mit zunehmender Temperatur ab.

Tabelle 7-17: Werte der Viskosität und der Dichte für den Temperaturbereich des Infiltrationswassers

T	$\eta$	$\rho$	$k_{f,S}$	$k_{f,K}$
[°C]	[kg/m·s]	[kg/m³]	[m/s]	[m/s]
6	$1,47 \cdot 10^{-3}$	1000,1	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$
8	$1,38 \cdot 10^{-3}$	999,8	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
10	$1,31 \cdot 10^{-3}$	999,5	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
12	$1,24 \cdot 10^{-3}$	999,2	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$
14	$1,17 \cdot 10^{-3}$	998,9	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
16	$1,11 \cdot 10^{-3}$	998,6	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$
18	$1,06 \cdot 10^{-3}$	998,2	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$
20	$1,01 \cdot 10^{-3}$	997,9	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$
22	$9,6 \cdot 10^{-4}$	997,6	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
24	$9,2 \cdot 10^{-4}$	997,3	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$
26	$8,7 \cdot 10^{-4}$	997,0	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$

Die Temperatur des Infiltrationswassers wirkt sich dabei nicht nur auf die Viskosität und die Dichte des Wassers aus, sondern auch auf den Durchlässigkeitsbeiwert. Mit Gleichung (2.7) aus Kapitel 2.1 besteht ein Zusammenhang zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert und der Permeabilität eines Materials sowie der Dichte und der dynamischen Viskosität des durchströmenden Fluids. Mit der Gleichung nach Hazen wurde der Durchlässigkeitsbeiwert der beiden Filterschichten bestimmt. Dabei gilt die verwendete Gleichung für eine Wassertemperatur von 10 °C. Mit den entsprechenden Eigenschaften für Wasser bei dieser Temperatur kann die Permeabilität der Filtersandschicht zu  $3,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$  und die der Filterkiesschicht zu  $6,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  bestimmt. Mit diesen Werten und den jeweiligen Werten für die Dichte sowie die Viskosität des Wassers, kann für verschiedene Temperaturen der Durchlässigkeitsbeiwert berechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 7-17 dargestellt. Mit steigender Temperatur vergrößert sich der Durchlässigkeitsbeiwert beider Filterschichten. Sofern die gewählte Strömungsberechnung keine Temperaturberücksichtigung beinhaltet, können mit der Verwendung der temperaturabhängigen Durchlässigkeitsbeiwerte die mit der Temperatur verbundenen Veränderungen zu einem gewissen Teil miteinbezogen werden.

$$K_S = \frac{k_{f,S} \cdot \eta}{\rho \cdot g} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,31 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{999,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 3,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \quad (7.4)$$

$$K_K = \frac{k_{f,K} \cdot \eta}{\rho \cdot g} = \frac{4,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,31 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{999,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 6,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \quad (7.5)$$

In Spring wird bei der Wärmetransportrechnung der Einfluss der Temperatur auf die Viskosität und die Dichte des Wassers berücksichtigt und für die entsprechenden Temperaturen mit den in Kapitel 2.2 aufgezeigten Formeln berechnet. Dies ist bei der einfachen stationären Strömungsberechnung nicht der Fall. Als Annäherung kann der Einfluss der Temperatur aber mit den durch die Temperatur veränderten  $k_f$ -Werten aus Tabelle 7-17 berücksichtigt werden. Inwiefern die Simulationsergebnisse der beiden Varianten voneinander abweichen, wird anschließend überprüft, wobei die resultierende Infiltrationsmenge einmal über eine einfache stationäre Strömungssimulation mit den entsprechenden  $k_f$ -Werten für die Filterschichten aus der oben stehenden Tabelle verwendet werden und einmal über



eine stationäre Wärmetransportrechnung mit der jeweiligen Temperatur des Infiltrationswassers. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Tabelle 7-18 zu sehen. Es zeigt sich, dass trotz einer Anpassung des Durchlässigkeitsbeiwertes unterschiedliche Werte für die Infiltrationsmenge berechnet werden. Ursache hierfür ist unter anderem, dass nicht nur die Durchlässigkeitsbeiwerte der Filterschicht im Infiltrationsorgan von der Temperatur des Fluids abhängig sind, sondern auch die des Anstehenden. Da das Infiltrationswasser sich mit dem Grundwasser vermischt und sich dadurch bereichsweise unterschiedliche Wassertemperaturen einstellen, wäre eine manuelle Berücksichtigung der Auswirkung der Temperatur auf den Durchlässigkeitsbeiwert mit einem hohen Aufwand verbunden. Zudem ist die Berechnung eines an die Temperatur angepassten Durchlässigkeitsbeiwertes nur eine Annäherung an den realen Wert.

Tabelle 7-18: Vergleich zwischen der resultierenden Infiltrationsmenge ermittelt über eine einfache Strömungsberechnung und über eine Wärmetransportrechnung

Parameter	k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	k <sub>f</sub> -Wert Filterkies	Überstauhöhe	Resultierende Infiltrationsmenge
	[m/s]	[m/s]	[m]	[m³/h]
Temperatur des Infiltrationswassers: 20 °C				
Einfache Strömungsberechnung	3,8·10 <sup>-3</sup>	6,0·10 <sup>-2</sup>	1,0	18,6
Wärmetransport- rechnung	2,9·10 <sup>-3</sup>	4,6·10 <sup>-2</sup>	1,0	15,7
Temperatur des Infiltrationswassers: 10 °C				
Einfache Strömungsberechnung	2,9·10 <sup>-3</sup>	4,6·10 <sup>-2</sup>	1,0	18,0
Wärmetransport- rechnung	2,9·10 <sup>-3</sup>	4,6·10 <sup>-2</sup>	1,0	

Bei beiden Temperaturbetrachtungen liegen die Werte der einfachen stationären Strömungsberechnung höher als die der Wärmetransportrechnung. Dies sollte im Hinblick auf eine mögliche Dimensionierung eines Infiltrationsorgans mittels einer einfachen stationären Strömungssimulation berücksichtigt werden, sodass abweichend von den Simulationsergebnissen im Betrieb geringere Infiltrationsmengen zu erwarten sind.

Welchen quantitativen Einfluss die Wassertemperatur auf die Infiltrationsleistung hat wird anschließend durch Simulationen mit verschiedenen Wassertemperaturen überprüft. Dafür werden die Werte für die Durchlässigkeit der Filterschichten sowie für die des Anstehenden aus der Kalibrierung des Modells übernommen und es wird eine Überstauhöhe von 1 m angesetzt. Die Temperatur des Infiltrationswassers wird sukzessive von 6 °C auf 26 °C in 5 °C – Schritten erhöht. Eine Auflistung der genauen Ergebnisse findet sich in Tabelle H-4 der Anlage H wieder.

In Abbildung 7-25 auf der folgenden Seite sind die Ergebnisse dieser Untersuchung als Diagramm dargestellt. Bei gleichbleibenden Randbedingungen steigt die Infiltrationsmenge mit der Temperatur des Infiltrationswassers. Es liegt ein linearer Zusammenhang vor. Bei einer minimalen Wassertemperatur von 6 °C in den Wintermonaten und 26 °C in den Sommermonaten resultiert alleine aufgrund des Temperaturunterschieds im Winter eine um 35 % geringere Infiltrationsmenge. Dieser Einfluss auf die Infiltrationsleistung sollte daher nicht unterschätzt und bei Planungen zukünftiger Infiltrationsanlagen berücksichtigt werden.

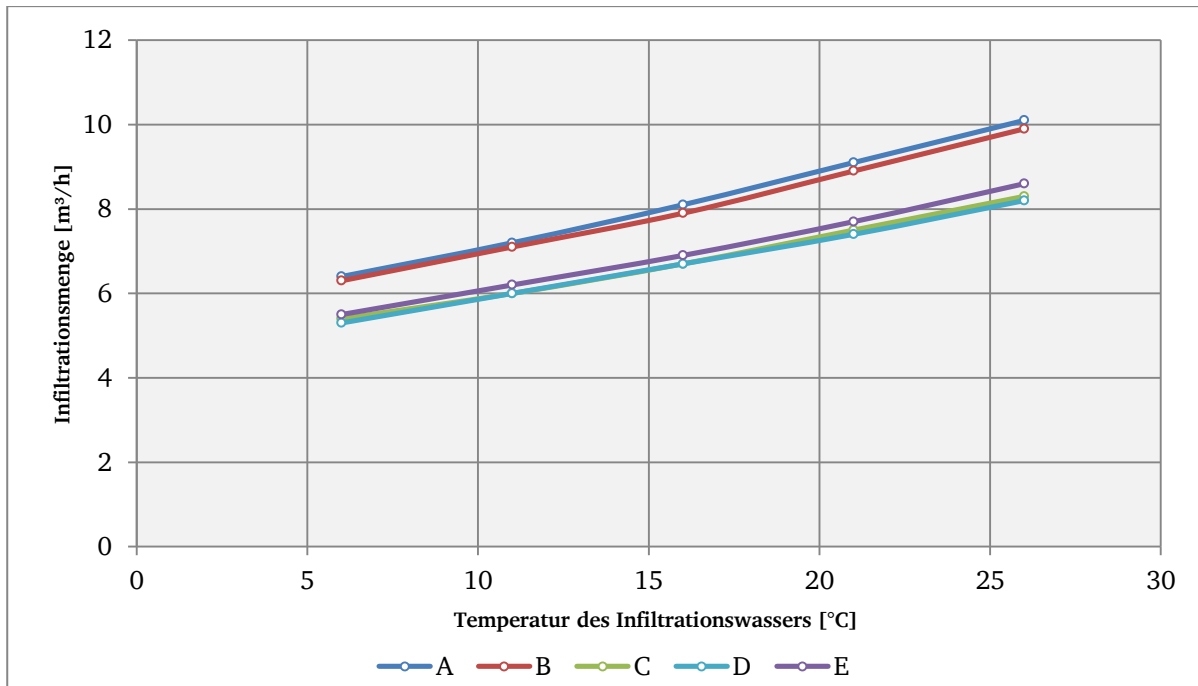


Abbildung 7-25: Auswirkungen der Temperatur des Infiltrationswassers auf die Infiltrationsmenge

#### 7.5.4 Hydraulischer Gradient

Zwei Parameter bestimmen den hydraulischen Gradienten maßgeblich: der Grundwasserstand und die Überstauhöhe im Kiesbohrloch. Daher werden beide unabhängig voneinander durch zwei verschiedene Simulationsszenarien untersucht und deren Einfluss auf die Infiltrationsleistung quantifiziert. Um die resultierenden Infiltrationsmengen an den fünf Kiesbohrlöchern des Organs 6 besser miteinander vergleichen zu können, wird der Durchlässigkeitsbeiwert für die Filterschicht für alle Kiesbohrlöcher mit  $3,0 \cdot 10^{-4}$  m/s definiert. Zusätzlich zu diesem Wert bilden die aus der Kalibrierung gewonnenen Durchlässigkeitsbeiwerte für den Filterkies und für das Anstehende sowie eine Überstauhöhe von 1 m den Ausgangszustand. An den anderen im Modellgebiet vorhandenen Organen wird kein Wasser infiltriert. Da die Temperatur als Randbedingung bei dieser Betrachtung konstant bleibt, ist eine einfache stationäre Strömungssimulation ausreichend. Zunächst wird der Grundwasserstand betrachtet. Hierbei wird ausgehend von einem mittleren Grundwasserstand dieser sukzessive erhöht bzw. verringert bis eine Differenz von 1 m erreicht ist. Die Werte für den Ausgangszustand liegen am Ostrand bei 89,3 müNN und am Westrand bei 87,7 müNN. In Tabelle H-5 in Anlage H sind die Ergebnisse dieser Simulationen hinterlegt.

In Abbildung 7-26 auf der folgenden Seite sind die Ergebnisse als Diagramm dargestellt. Es zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Grundwasserstand und der Infiltrationsmenge, wobei die Menge mit steigendem Grundwasserstand aufgrund des geringeren hydraulischen Gradienten sinkt. Deutlich zu erkennen ist hierbei auch der von der Höhenlage der Kiesbohrlöcher A und B resultierende höhere hydraulische Gradient, der unabhängig vom Grundwasserstand eine höhere Infiltrationsmenge bedingt als an den anderen Bohrlöchern. Zusätzlich hierzu zeigt sich eine weitere Besonderheit bei A und B: Ab einer Reduzierung des Grundwasserstands von 0,8 m liegen am Bohrloch A entkoppelte Strömungsverhältnisse vor, bei Bohrloch B ab einer Reduzierung von 1 m. Aus diesem Grund steigt die Infiltrationsmenge zu diesem Zeitpunkt nicht mehr linear an, sondern verringert sich etwas. Niedrigere Grundwasserstände wirken sich demnach positiv auf die Infiltrationsleistung aus. Ein um 0,4 m niedrigerer Wasserstand sorgt für eine um etwa 12% gesteigerte Infiltrationsmenge. Da auf den Stand des Grundwassers großräumig nur bedingt Einfluss genommen werden kann bzw. die Infiltration ein erwünschtes Ansteigen des Wassers bewirkt, stellt dieser Parameter keine Grundlage für eine Optimierung des Infiltrationsbetriebs dar. Jedoch muss der Grundwasserstand bei der Beurteilung einer Reduzierung der Infiltrationsleistung durch eine Kolmation berücksichtigt werden.

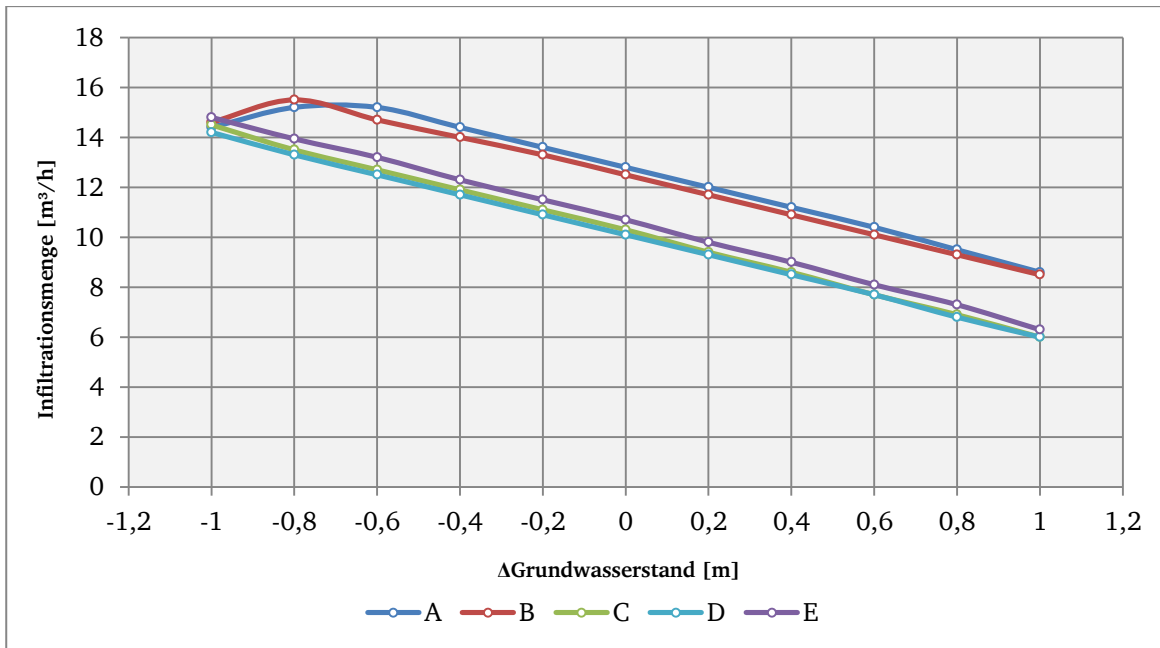


Abbildung 7-26: Auswirkungen des Grundwasserstands auf die Infiltrationsmenge

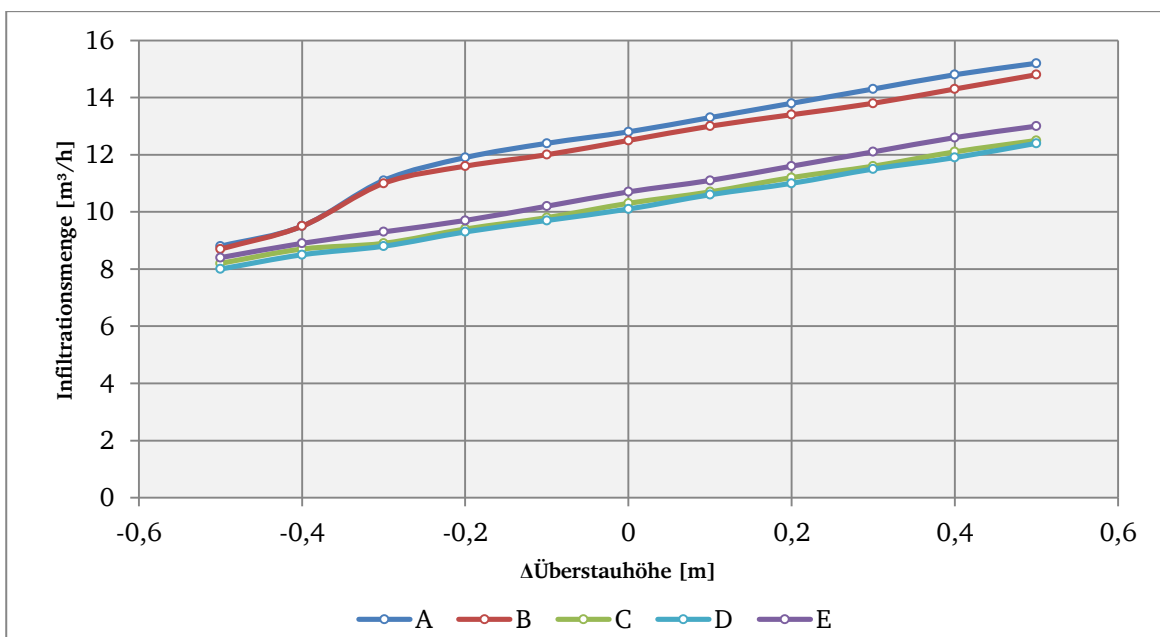


Abbildung 7-27: Auswirkungen der Überstauhöhe auf die Infiltrationsmenge

Die Überstauhöhe hingegen stellt einen Parameter dar, auf den direkt Einfluss genommen werden kann und der wie der Grundwasserstand den hydraulischen Gradienten bestimmt. Zur Quantifizierung der Auswirkungen auf die Infiltrationsleistung wird wie zuvor eine Untersuchung durchgeführt, bei der jedoch der Grundwasserstand konstant bleibt und die Überstauhöhe variiert wird. Ausgangszustand ist dabei eine Höhe von 1 m die graduell bis zu 0,5 m verringert bzw. erhöht wird. Abbildung 7-27 zeigt die Simulationsergebnisse in Form eines Diagramms. Die genauen Werte sind in Anlage H in Tabelle H-6 aufgelistet. Wie zuvor beim Grundwasserstand liegt auch hier eine lineare Beziehung zwischen der Überstauhöhe und der resultierenden Infiltrationsmenge vor, wobei mit steigender Höhe die Infiltrationsmenge ebenfalls zunimmt. Auch hier ist der generell höhere hydraulische Gradient an den Bohrlöchern A und B aufgrund der unterschiedlichen Höhenlage im Vergleich zu den anderen Kiesbohrlöchern zu erkennen. Eine Entkopplung der Strömungsverhältnisse sorgt zu einem Bruch in der linearen Beziehung. Ab einer Reduzierung der Überstauhöhe von mehr als 0,4 m liegen an den

beiden Bohrlöchern A und B entkoppelte Druckverhältnisse vor. Dies kompensiert augenscheinlich nahezu den Vorteil des hydraulischen Gradienten in Folge der Höhenlage. Eine Erhöhung des Überstaus von 0,5 m sorgt für eine um 16 % gesteigerten Infiltrationsmenge bei A und B und um 18 % bei C - E.

### 7.5.5 Beeinflussung der Infiltrationsleistung durch andere Organe

Nun wird die gegenseitige Beeinflussung zwischen den einzelnen Infiltrationsorganen betrachtet. Neben dem Organ 6 liegend die Organe 5 und 7 mit einem Abstand von etwa 280 m bzw. 320 m. Um die Auswirkungen besser quantifizieren zu können, wird der Durchlässigkeitsbeiwert der Filtersandschicht in den Kiesbohrlöchern mit  $3,0 \cdot 10^{-4}$  m/s definiert. Mit einer festen Überstauhöhe von 1 m ist die Infiltrationsmenge das Simulationsergebnis. Die Menge an den anderen Organen wird von 0 m<sup>3</sup>/h auf 25 m<sup>3</sup>/h in Schritten von 5 m<sup>3</sup>/h erhöht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der folgenden Abbildung 7-28 als Diagramm dargestellt sowie ausführlich in Tabelle H-7 in Anlage H dokumentiert.

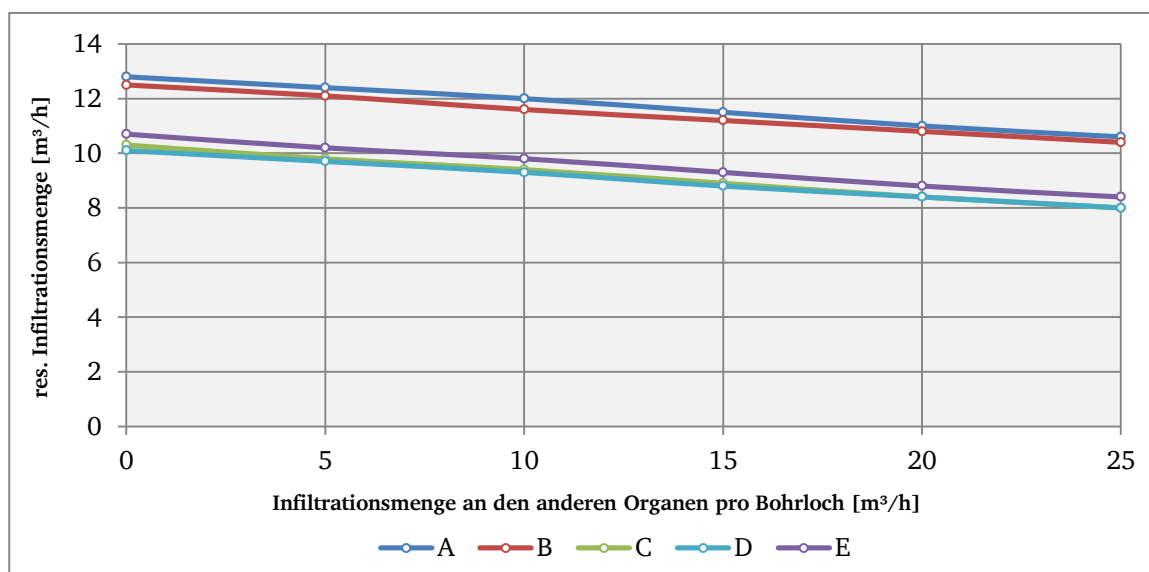


Abbildung 7-28: Einfluss der Infiltration anderer Organe auf die Infiltrationsmenge des Organs 6

Die Infiltration an den anderen Organen wirkt sich auf den Grundwasserstand aus: Je höher die Infiltration, desto höher steigt der Grundwasserstand und desto geringer ist der hydraulische Gradient. Dass ein linearer Zusammenhang zwischen Grundwasserstand und Infiltrationsmenge besteht, wurde bereits im vorherigen Abschnitt erläutert. Steigt die Infiltrationsmenge an den anderen Organen pro Bohrloch um 5 m<sup>3</sup>/h, so verringert sich die Infiltrationsmenge am Organ 6 um etwa 5 %.

### 7.5.6 Beeinflussung der Infiltrationsleistung durch die Kiesbohrlöcher

Nach der Betrachtung der Beeinflussung zwischen den Organen folgt die Untersuchung der Beeinflussung zwischen den einzelnen Kiesbohrlöchern des Infiltrationsorgans 6. Dabei wird jedes Bohrloch einzeln betrachtet. An dem entsprechenden Bohrloch bleibt die Überstauhöhe von 1 m konstant und an den anderen Bohrlöchern wird die Infiltrationsmenge sukzessive erhöht. An den anderen im Modellgebiet liegenden Organen findet dabei keine Infiltration statt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung finden sich in Anlage H in Tabelle H-8 wieder sowie in Abbildung 7-29 auf der folgenden Seite.

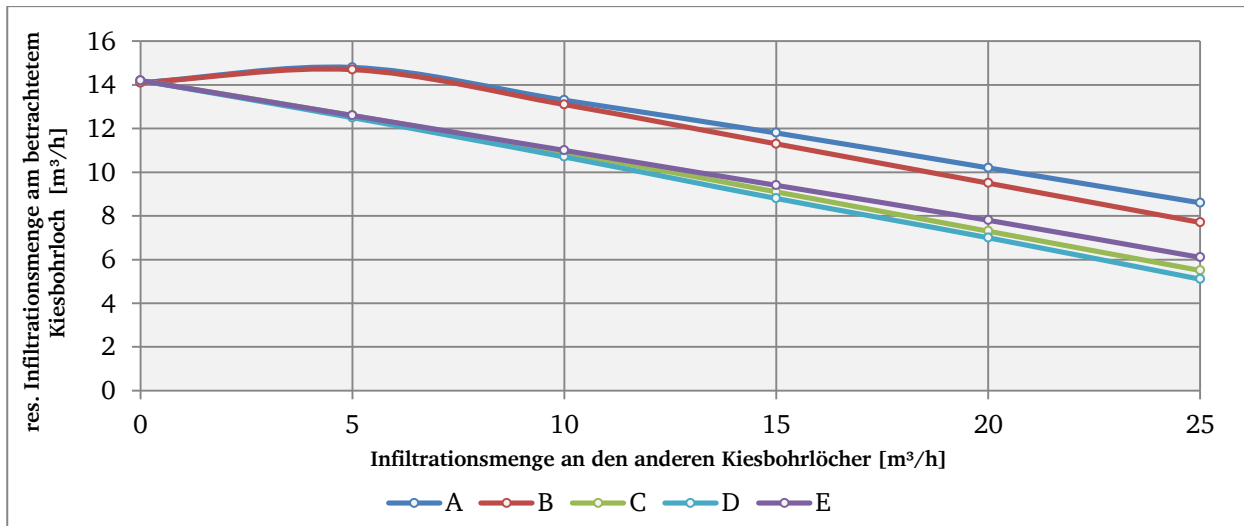


Abbildung 7-29: Einfluss der Infiltration an den anderen Kiesbohrlöcher auf die Infiltrationsmenge des betrachteten Kiesbohrlochs am Organ 6

Auch hier ist mit der Steigerung der Infiltration an den anderen Bohrlöchern eine Erhöhung des Grundwasserstandes verbunden. Durch den geringeren hydraulischen Gradienten resultieren niedrigere Infiltrationsmengen. Bei den Kiesbohrlöchern A und B steigt jedoch zunächst die Infiltrationsmenge, da zu Beginn der Untersuchung ohne Infiltration an den anderen Bohrlöchern entkoppelte Strömungsverhältnisse vorliegen. Anschließend zeigt sich auch hier der lineare Zusammenhang zwischen Infiltrationsmenge der anderen Bohrlöcher und der resultierenden Menge am betrachteten Bohrloch. Ebenso zu erkennen ist der Einfluss des höheren hydraulischen Gradienten aufgrund der höheren geodätischen Lage von A und B. Zusätzlich weisen die Funktionen unterschiedliche Steigungen auf. Die Funktionen der außen liegenden Bohrlöcher A und E haben eine geringere Steigung als die der anderen Bohrlöcher. Das deutet darauf hin, dass die außen liegenden Bohrlöcher durch die Infiltration an den anderen Bohrlöchern geringer beeinflusst werden als die innen liegenden. Jedoch ist dieser Unterschied gering und daher nicht ausschlaggebend für die Infiltrationsleistung.



---

## 8 Modellierung des Sickerschlitgrabens im Gernsheimer Wald

---

Für das hochaufgelöste dreidimensionale Nahbereichsmodell eines Sickerschlitgrabens wird das Infiltrationsorgan 2 im Gernsheimer Wald gewählt. Dieser Sickerschlitgrabens ist seit jeher ein Versuchsorgan, sodass durch verschiedene Messeinrichtungen und Versuchsdurchführungen eine für die Modellierung benötigte Datengrundlage vorhanden ist. Für die Bearbeitung der vorliegenden Fragestellung ist ebenso wie beim vorherigen Modell die Verwendung eines stationären Modells ausreichend. Dabei wird das Finite-Element-Modell des Sickerschlitgrabens gleichfalls erstellt, um die gekoppelte Innen- und Außenströmung, die resultierenden lokalen Geschwindigkeiten sowie die Wechselwirkungen mit anderen Infiltrationsorganen zu untersuchen. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte der Modellerstellung für das Infiltrationsorgan 2 im Gernsheimer Wald näher erläutert sowie die Ergebnisse der Untersuchung der grundwasserhydraulischen Parameter dokumentiert.



Abbildung 8-1: Sickerschlitgrabens im Gernsheimer Wald (Organ 2)

In Abbildung 8-1 ist der Sickerschlitgrabens im Gernsheimer Wald zu sehen. Er hat eine Länge von 75 m, ist einen Meter breit und weist eine Endteufe von 6 m auf. Der Graben ist mit Platten abgedeckt, um einen Eintrag von Fremdstoffen sowie von Sonnenlicht zu vermeiden. Die Filterkiesschicht im Graben hat eine Mächtigkeit von 5 m, über der zwei zusätzliche Filterschichten aufgetragen sind: Zunächst eine 20 cm mächtige Filtersandschicht und anschließend nochmals Kies mit einer Mächtigkeit von 10 cm. Auf der oberen Filterkiesschicht ist ein geschlitztes Rohr verlegt, mit dem eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Infiltrationswassers erfolgen soll. Bei mittleren Infiltrationsmengen ist lediglich das erste Drittel des Grabens mit Wasser eingestaut, bei höheren Infiltrationsmengen breitet sich der Einstau über die Länge des Infiltrationsgrabens aus. Im Graben sind für eine gezielte Datensammlung sechs Rammfilterlanzen eingebracht, die in zwei unterschiedlichen Höhen verfiltert sind und mit denen somit die Druckverhältnisse im Sickerschlitgrabens aufgezeichnet werden können.

Abbildung 8-2 auf der folgenden Seite zeigt die Infiltrationsmenge pro Monat am Sickerschlitgrabens von Januar 1994 bis April 2018. Hierbei ist ebenso die Einstellung der Infiltration zu Beginn der 2000er deutlich zu erkennen, wie auch die durch die Revision des Wasserwerks Biebesheim bedingte Infiltrationspause Anfang des Jahres. Ausgenommen des etwa zweieinhalb jährigen Infiltrationsstopps Anfang der 2000er Jahre liegt die mittlere Infiltrationsmenge mit etwa  $39.000 \text{ m}^3/\text{Monat}$  höher als bei der Kiesbohrlochgruppe 6 im Jägersburger Wald. Dies entspricht etwa  $53 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die maximale Infiltrationsmenge mit etwa  $113.000 \text{ m}^3/\text{Monat}$  wurde im September 2012 erreicht und ist knapp doppelt so hoch wie die maximale Infiltrationsmenge am Organ 6. In Anlage C ist eine Fotodokumentation des Infiltrationsorgans hinterlegt, in der das Mess- und Regelbauwerk des Organs abgebildet ist sowie der sichtbare Teil oberhalb des Geländes und der Innenbereich.

Infiltrationsmenge am Organ 2 im Gernsheimer Wald

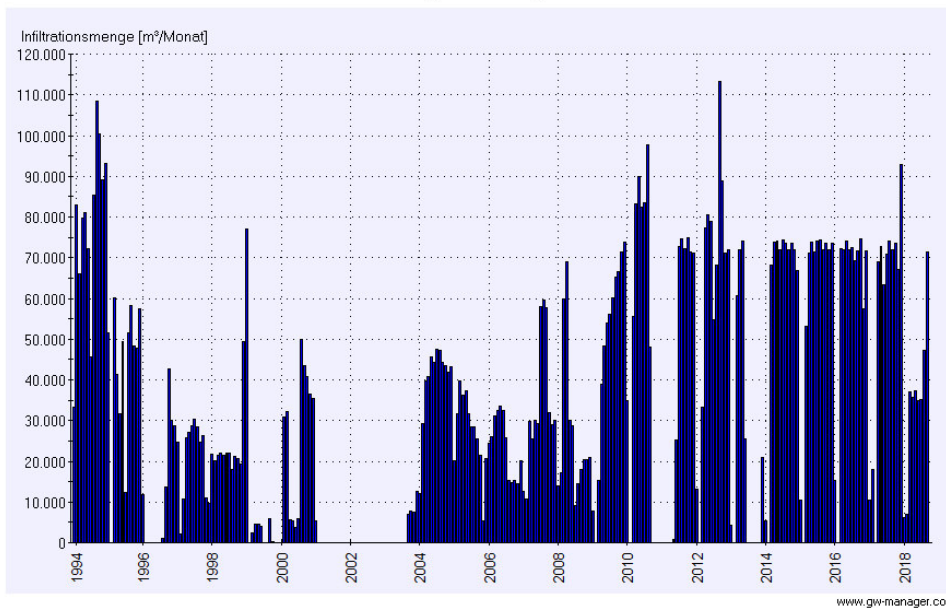


Abbildung 8-2: Infiltrationsmenge am Organ 2 im Gernsheimer Wald von 1994 bis 2018

## 8.1 Datenaufbereitung

Am Sickerschlitzen im Gernsheimer Wald wurde 2012 ein Infiltrationsversuch durchgeführt. Dabei wurde die Infiltrationsmenge über einen längeren Zeitraum stark variiert und mit Datenloggern die resultierenden Druckverhältnisse im Sickerschlitzen über die im Graben vorhandenen Rammfilterlanzen aufgezeichnet. Zusätzlich dazu wurde die Temperatur des Infiltrationswassers gemessen. Alle gesammelten Daten sind in Anlage F mit Abbildung F-7 in einem Diagramm zusammengefasst. Die Rammfilterlanzen A1 und A2 liegen 12,75 m, B1 und B2 37,85 m und C1 und C2 62,2 m vom Zulauf entfernt. Während des Infiltrationsversuchs wurden in der Rammfilterlanze C1 jedoch keine Daten aufgenommen. Die Temperatur des Infiltrationswassers schwankt in einem gleichen Bereich wie schon zuvor die Aufzeichnung der Temperatur am Organ 6 im Jägersburger Wald gezeigt hat. Die höchste Temperatur des Infiltrationswassers liegt bei 26,6 °C und wurde im August erreicht, die niedrigste Temperatur mit 11,6 °C wurde zum Ende des Versuchs im November gemessen. Es ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 15 °C. Aus den Daten des Infiltrationsversuchs werden für die Kalibrierung des Modells Datensätze mit möglichst stationärem Verlauf gewählt. Dies liegt bspw. zu Beginn des Versuchs bei einer Infiltrationsmenge von 111 m³/h und 100 m³/h vor.

Wie auch für die Kiesbohrlöcher liegt für den Sickerschlitzen lediglich der Bereich der Korndurchmesser für die Verfüllung im Graben vor, ohne genauen Verlauf der Kornsummenlinie. Daher wird auch für diesen Fall mit den gegebenen Werten der Durchlässigkeitsbeiwert für die entsprechenden Schichten nach Hazen berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in folgenden Tabelle 8-1 auf der folgenden Seite aufgelistet. Anders als bei den Kiesbohrlöchern ist oberhalb der Filtersandschicht noch eine zusätzliche 10 cm mächtige Filterkiesschicht aufgetragen, die in der Tabelle mit „Filterkies 1“ bezeichnet ist. Darauf folgt die 20 cm mächtige Filtersandschicht und anschließend bis zur Endteufe die Verfüllung mit dem „Filterkies 2“. Der Filterkies 1 und der Filtersand weisen die gleichen Korndurchmesser auf wie bei den Kiesbohrlöchern und es ergeben sich dadurch die gleichen Wertebereiche für den Durchlässigkeitsbeiwert. Die Körnung des Filterkieses 2 liegt bei 0,4 – 2,2 mm wodurch sich ein minimaler  $k_f$ -Wert von  $1,9 \cdot 10^{-3}$  m/s und ein maximaler Wert von  $5,6 \cdot 10^{-2}$  m/s ergeben. In Anlehnung an die Modellierung des Kiesbohrlochs werden für dieses Modell ebenfalls zunächst die minimalen Werte für den Filterkies 1 und den Filtersand gewählt. Aufgrund des Wertes von  $2,9 \cdot 10^{-3}$  m/s für den Filtersand, wird für die Hauptverfüllung im Sickerschlitzen ein Wert von  $2,0 \cdot 10^{-2}$  m/s festgelegt.

Tabelle 8-1: Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte nach Hazen

	Körnung	min. $k_f$ -Wert	max. $k_f$ -Wert
	[mm]	[m/s]	[m/s]
Filterkies 1	2,0 – 3,15	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
Filterkies 2	0,4 – 2,2	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$
Filtersand	0,5 – 1,0	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$

## 8.2 Modellaufbau

Ziel der Modellierung ist die Identifizierung der maßgebenden grundwasserhydraulischen Parameter, die am Organ 2 im Gernsheimer Wald für die Infiltrationsleistung ausschlaggebend sind und die Neigung zur Alterung an diesem Organ bestimmen. Das Organ 2 ist ein Sickerschlitzzgraben mit einer Länge von 75 m, einer Breite von 1 m und einer Tiefe von 6 m. Dieser Sickerschlitzzgraben wurde für die Modellierung ausgewählt, da es sich in erster Linie um ein Versuchsorgan handelt und daher eine gute Datengrundlage vorhanden ist. Bei der Modellierung werden die jeweils benachbarten Organe 1 und 3 einbezogen, um eine mögliche gegenseitige Beeinflussung untersuchen und quantifizieren zu können.

Wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, wurde auch hier zunächst der Modellrand festgelegt, wobei ebenso auf die Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried zurückgegriffen wird. Der gewählte Modellrand ist in Abbildung 8-3 auf der folgenden Seite schwarz dargestellt, die Grundwassergleichen als rote Linien, die Infiltrationsorgane mit gelben sowie die Brunnen mit blauen Punkten. Die drei in einem Dreieck liegenden Brunnen sind diejenigen der Stadt Gernsheim. Auch bei diesem Modell werden die unmittelbaren Nachbarorgane des Sickerschlitzzgrabens in das Modell einbezogen: Aufgrund der Lage werden die Infiltrationsorgane 1 – 5 in das Modell aufgenommen und 6 - 18 ausgeschlossen. Da die Grundwassergleichen die Lage der im Gebiet vorhandenen Entnahmehbrunnen der Stadt Gernsheim und des Wasserwerks Allmendfeld kreuzen, werden diese mit in das Modell integriert, um eine geeignete Modellgrenze festlegen zu können. Die gewählte nordwestlich gelegene Abgrenzung, mit einem abgeschätzten Wert von 86,8 müNN, schneidet dabei den Kohlbruchgraben, der in Abbildung 8-3 als gelbe Linie dargestellt ist. Da dieser allerdings nur sehr selten zur Infiltration genutzt wird, in den letzten vier Jahren kein Wasser in den Graben zur Infiltration geleitet wurde (s. Abbildung B-5 in Anlage B) und zudem bei der Festlegung der Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried nicht mit einbezogen wurde, wird er nicht weiter berücksichtigt und auch nicht mit in das Modell aufgenommen. Die östlich gelegene Abgrenzung stellt die Grundwassergleiche mit dem Wert 89,0 müNN dar. Auch hier besteht die Verbindung zwischen den beiden gewählten Gleichen als Rändern aus Grundwasserstromlinien. Mit zusätzlichen Gleichenplänen aus dem Wasserrechtsverfahren der Infiltration im Gernsheimer Wald von 2005 wird auch hier überprüft, ob der gesamte Einflussbereich der Infiltration im gewählten Gebiet enthalten und ein genügender Abstand zu den Modellgrenzen vorhanden ist, sodass die Berechnungsergebnisse nicht von den Randbedingungen verfälscht werden. Mit einer Fläche von etwa 5,6 km<sup>2</sup> ist dieses Modell etwas größer als das Modell für den Jägersburger Wald.

Wie beim vorherigen Modell stellen die Lage- und Ausbaupläne der Infiltrationsorgane, welche in Anlage C zu finden sind, die Grundlage für die Erstellung der jeweiligen Strukturen dar. Bei der Erzeugung der Bohrlochstrukturen wurde dabei gleichermaßen vorgegangen wie bei den Bohrlöchern des vorherigen Modells. Bei der Erstellung der Struktur für die Kiesbohrlochgruppe 3 stellte sich heraus, dass die Koordinaten des Bohrlochs B nicht korrekt sind. In Bezug auf die Geometrie im entsprechenden Ausbauplan wurden schließlich neue Koordinaten bestimmt und in das Modell übernommen.



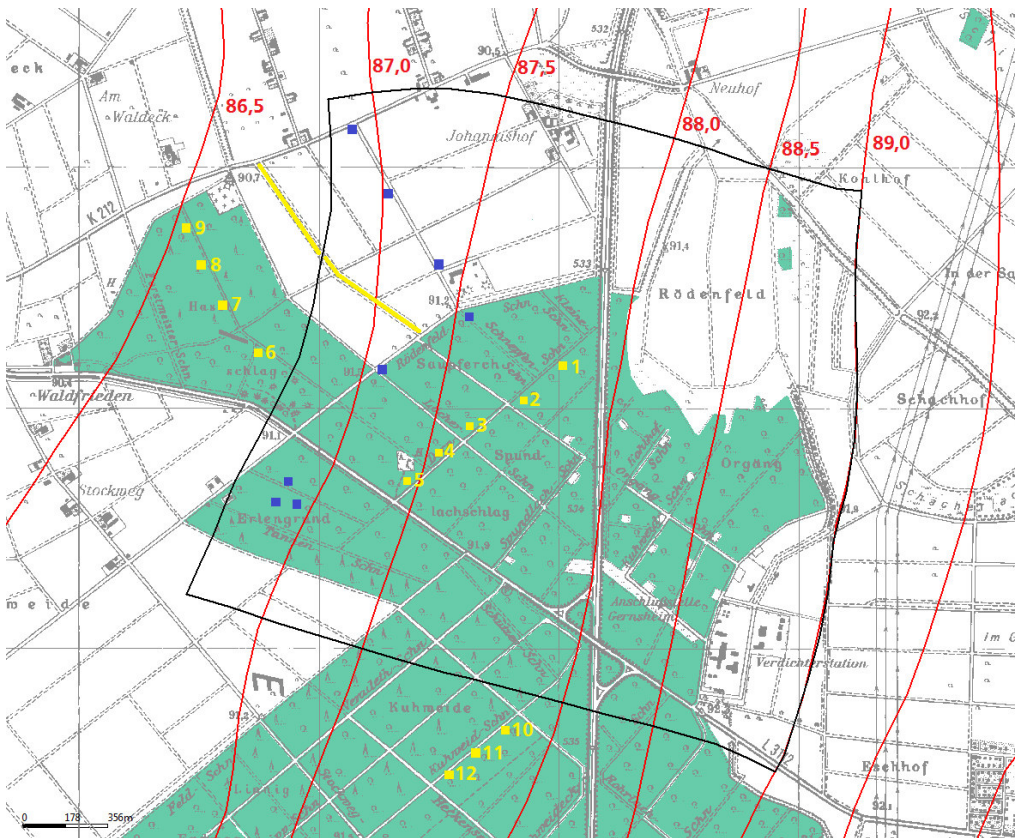


Abbildung 8-3: Gewählter Modellrand für die Modellierung des Infiltrationsorgans 2 im Gernsheimer Wald

Für den Sickerschlitgrabens sind in dem entsprechendem Plan (s. Abbildung C-15 in Anlage C) Koordinaten aufgeführt. Hierbei handelt es sich um die Außeneckpunkte des Sickerschlitgrabens, die Wandstärke mit eingenommen. Demnach werden neue Koordinaten berechnet in Abhängigkeit zur Breite und Länge des Grabens und schließlich als Linienstruktur in das Modell implementiert. In Abbildung D-14 in Anlage D ist die Struktur des Sickerschlitgrabens zu sehen, wobei das innere Rechteck die Ausmaße der Kiesverfüllung darstellt und beim äußeren Rechteck die Stärke der Wand enthalten ist. Die im Schnitt B – B des Ausbauplans in Anlage D eingezeichneten Balken in einer Tiefe von 1,05 muGOK werden bei der Strukturbildung des Sickerschlitgrabens nicht berücksichtigt, da diese keinen nennenswerten Einfluss auf die Infiltrationsleistung haben. Innerhalb des Sickerschlitgrabens sind Rammfilterlanzen eingebaut, um die Infiltrationsleistung mit Hilfe von Loggern überprüfen zu können. Die Lage dieser Lanzen wird durch Strukturpunkte in die Modellierung integriert, damit die an den dadurch entstehenden Netzknoten berechneten Werte mit den gemessenen Werten verglichen werden können. Diese Strukturpunkte der Rammfilterlanzen sowie einige Grundwassermessstellen direkt im Umfeld des Organs sind in Abbildung D-14 in Anlage D zu sehen.

In Abbildung 8-4 auf der folgenden Seite sind die für die Netzgenerierung relevanten Strukturen zu sehen, wobei die einzelnen Infiltrationsorgane deutlich zu erkennen sind. Die Entnahmebrunnen werden lediglich als Punktstrukturen in das Modell eingefügt, da für die Fragestellung die genauen Fließverhältnisse an sowie in den Brunnen irrelevant sind und die Entnahmemenge über die Festlegung eines entsprechenden Attributwertes für den erzeugten Netzknoten erfolgt. In gemeinsamer Betrachtung mit Abbildung 8-3 können die entsprechenden Punktstrukturen der Brunnen identifiziert werden. Alle restlichen Punktstrukturen stellen in das Modell integrierte Grundwassermessstellen dar.

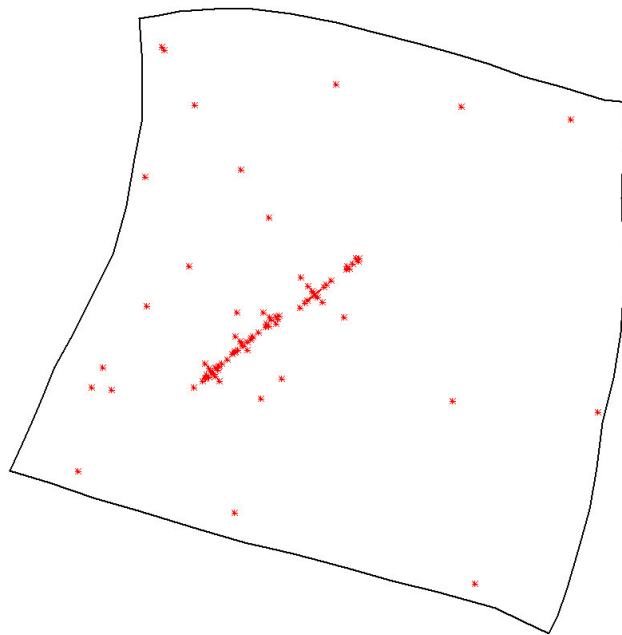


Abbildung 8-4: Für die Netzgenerierung relevante Strukturen

Um wie beim Modell für die Kiesbohrlochgruppe im Jägersburger Wald ein feines gleichmäßiges Finite-Element-Netz innerhalb der Infiltrationsorgane für die genaue Untersuchung der gekoppelten Innen- und Außenströmung sowie der lokalen Geschwindigkeiten zu erzeugen, wird hierfür ein Raster erstellt. Dies wurde für die Kiesbohrlöcher ebenso wie bei dem Modell des Organs 6 im Jägersburger Wald mit der Implementierung einer entsprechenden Struktur mit einer Maschenweite von 25 cm umgesetzt. Beim Sickerschlitzgraben wurde das entsprechende Tool von Spring verwendet und ein Raster mit einer Maschenweite von 20 cm erstellt bei einer Länge des Grabens von 75 m und einer Breite von 1 m. Wie beim vorherigen Modell wurde auch hier die Lage verschiedener Grundwassermessstellen im Modellbereich mit Hilfe von Punktstrukturen übernommen, wobei deutlich mehr Messstellen, vor allem im näheren Umfeld der Infiltrationsorgane, vorhanden sind.

Anschließend werden mit Hilfe des entsprechenden Tools Konturpunkte um die Kiesbohrlöcher erstellt, um einen gleichmäßigen Übergang von feinen zu groben Elementen zu erzeugen. Da innerhalb des Modellgebiets Entnahmebrunnen vorhanden sind, wurden für diese Brunnen ebenso wie zuvor beschrieben Konturpunkte erstellt. Nach der Erzeugung von Konturen aus den relevanten Strukturen kann mit der Netzgenerierung begonnen werden. Hierbei werden ebenfalls eine maximale Fläche der Finite-Elemente von 15.000 m<sup>2</sup> und ein minimaler Winkel von 20 ° festgelegt. Das dadurch erzeugte Grundnetz ist mit verschiedenen Abbildungen in Anlage D dokumentiert. Gleichmaßen wie beim Modell für den Jägersburger Wald wird das Netz manuell um die einzelnen Infiltrationsorgane herum sowie zwischen diesen und vor allem der Übergang vom feinen Bereich innerhalb der Bohrlöcher nach außen verfeinert. Das hierdurch erzeugte Finite-Element-Netz ist in Abbildung 8-5 auf der folgenden Seite dargestellt. In der darauf folgenden Abbildung 8-6 ist das Finite-Element-Netz im näheren Umfeld des Infiltrationsorgans 2 zu sehen. Weitere Darstellungen des verfeinerten Netzes, unter anderem des Nahbereichs am Organ 2, sind in verschiedenen Abbildungen in Anlage D hinterlegt.



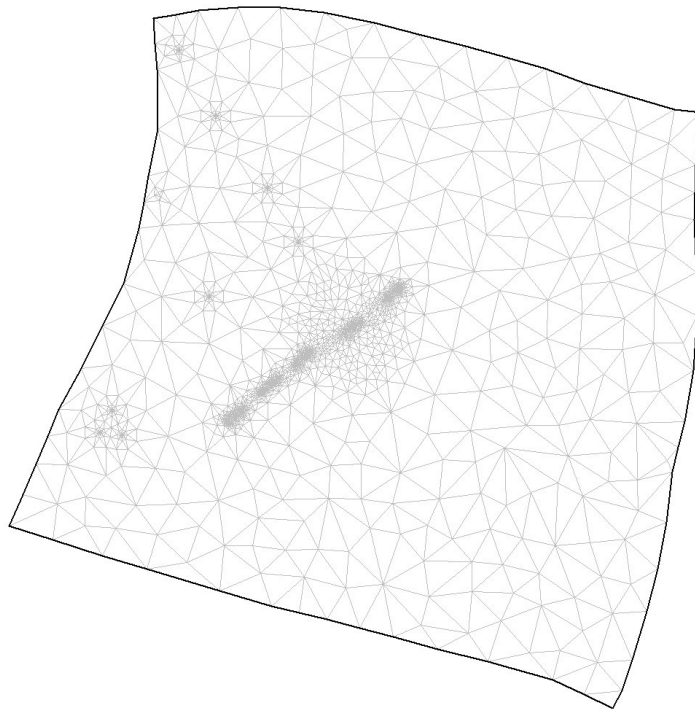


Abbildung 8-5: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet

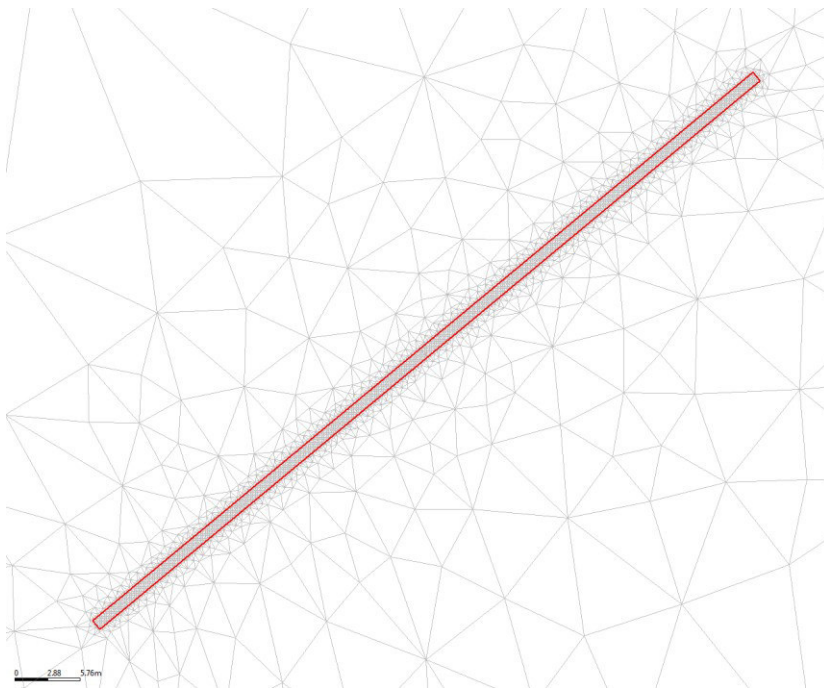


Abbildung 8-6: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet im Nahbereich des Sickerschlitzgrabens

Bei der Schichteinteilung wird genauso vorgegangen wie bei dem vorherigen Modell: Die Werte der Mächtigkeit des Grundwasserleiters werden aus dem großräumigen Modell der BGS UMWELT entnommen. Im Modellbereich hat der Grundwasserleiter eine Mächtigkeit von 89 – 118 m, die in Richtung des Odenwaldes zunimmt. In Anlage D ist mit Abbildung D-23 eine Übersicht über die Mächtigkeit des Grundwasserleiters zu finden. Die Zwangspunkte für die Schichteinteilung leiten sich aus den Ausbauplänen der Infiltrationsorgane sowie den vorhandenen Tonschichten ab. Da allerdings bei dem Plan der Kopfausbildung der Kiesbohrlöcher kein Bezug zur Geländeoberkante gegeben ist, wird dieser annähernd über die im Plan eingezeichneten Stufen zum Schachtdeckel erstellt, wonach die Oberkante des Schachtdeckels 0,57 m über der Geländeoberkante liegt. Dies entspricht den im Plan

der Kopfausbildung für den Jägersburger Wald enthaltenen Angaben, bei denen die Oberkante des Schachtdeckels 0,58 m über der Geländeoberkante liegt, die Höhe des Schachtdeckels jedoch 1 cm mehr aufweist als bei den Bohrlöchern des Gernsheimer Waldes.

Auch im Bereich des Gernsheimer Waldes wird der Grundwasserleiter durch zwei Tonschichten in Grundwasserstockwerke unterteilt. In Anlage D ist mit der Abbildung D-24 und Abbildung D-25 das Vorkommen dieser beiden Tonschichten im Modellgebiet dargestellt. Die obere Tonschicht beginnt dabei ebenso ab einer Tiefe von etwa 23 muGOK, weist jedoch einen  $k_f$ -Wert von  $8 \cdot 10^{-5}$  m/s auf. Die Ausbreitung dieser Schicht verläuft wie ein Band von der linken oberen Ecke des Modellgebiets zur rechten unteren Ecke, wobei unterhalb der Infiltrationsorgane 1 und 2 die größte Mächtigkeit vorliegt. Die untere Tonschicht beginnt ab einer Tiefe von etwa 46 muGOK, weist einen  $k_f$ -Wert von  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s auf und ist örtlich nur sehr begrenzt im Bereich der Organe 1 – 3 und der Entnahmebrunnen 5 und 6 des Wasserwerks Allmendfeld vorhanden. Mit den hieraus sowie aus dem Ausbau der Infiltrationsorgane abgeleiteten Zwangspunkten ergeben sich die Höhenlagen der ersten Knotenschichten, welche mit Tabelle E-7 inklusive einer kurzen Erläuterung in Anlage E gegeben sind.

Nach der Erstellung der Zwangsknotenschichten und –elementschichten werden den Elementen die entsprechenden  $k_f$ -Werte zugewiesen. Die Durchlässigkeit der beiden Tonschichten wurde bereits im vorherigen Absatz erläutert. Der Grundwasserleiter hat überwiegend eine Durchlässigkeit von  $5,25 \cdot 10^{-4}$  m/s, nur in einem zwischen 130 m und 440 m breiten Streifen über die gesamte Länge der südlichen Abgrenzung des Gebiets liegt der Wert bei  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s. Eine Darstellung der  $k_f$ -Werte ist mit Abbildung 8-8 in Abschnitt 8.3 gegeben. Ab einer Tiefe von etwa 90,5 muGOK ändert sich die Durchlässigkeit im gesamten Modellgebiet: Unter dem Bereich wo zuvor ein Wert von  $2,63 \cdot 10^{-4}$  m/s war ändert sich der Wert zu  $2,63 \cdot 10^{-4}$  m/s und im anderen Teil zu  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s.

In der folgenden Tabelle 8-2 sind die verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte für den Sickerschlitzzgraben und die Kiesbohrlöcher im Modellgebiet hinterlegt. Da die Bohrlöcher des Organs 4 eine größere Endteufe aufweisen, erstreckt sich der Filterkies im Verfüllbereich über zwei zusätzliche Elementschichten. Für den Einstaubereich innerhalb des Kiesbohrlochs wurde ein Wert von 1 m/s und für die Bauwerkswände als undurchlässiger Bereich ein Wert von  $1 \cdot 10^{-20}$  m/s definiert.

Tabelle 8-2: Zuweisung der Durchlässigkeit für das Modell im Gernsheimer Wald

Bereich	Elementschicht Nr.	Medium	$k_f$ -Wert [m/s]
SSG innen	1	Luft	1
	2	Filterkies 1	$4,6 \cdot 10^{-2}$
	3	Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	4-15	Filterkies 2	$2 \cdot 10^{-2}$
SSG außen	1-4	Wand	$1 \cdot 10^{-20}$
Verfüllbereich	1-5	Luft	1
	6-7	Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	8-15/8-17	Filterkies 1	$4,6 \cdot 10^{-2}$
1. Ring	1-4	Luft	1
	6-7	Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	8	Filterkies 1	$4,6 \cdot 10^{-2}$
	9	Wand	$1 \cdot 10^{-20}$
2. Ring	1-5	Luft	1
	6	Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	7-9	Wand	$1 \cdot 10^{-20}$
3. Ring	1-9	Wand	$1 \cdot 10^{-20}$

Die folgende Abbildung 8-7 zeigt einen Schnitt des Sickerschlitgrabens im Gernsheimer Wald über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters (links) und im Nahbereich (rechts). Farblich dargestellt sind dabei die unterschiedlichen Werte der Durchlässigkeit. Deutlich zu erkennen ist die Lage der oberen und unteren Tonschicht sowie der geringere  $k_f$ -Wert des Grundwasserleiters ab einer Tiefe von etwa 90 mGOK. Auf dem rechten Bild ist die Wand des Grabens in schwarz dargestellt. Ebenso erkennbar ist die Lage der oberen Kiesschicht sowie der Filtersandschicht oberhalb der Kiesverfüllung bis zur Endteufe. In Anlage D sind weitere Abbildungen vorhanden, die die Durchlässigkeit und die Lage der Elementschichten im Nahbereich eines Kiesbohrlochs im Modellgebiet darstellen.

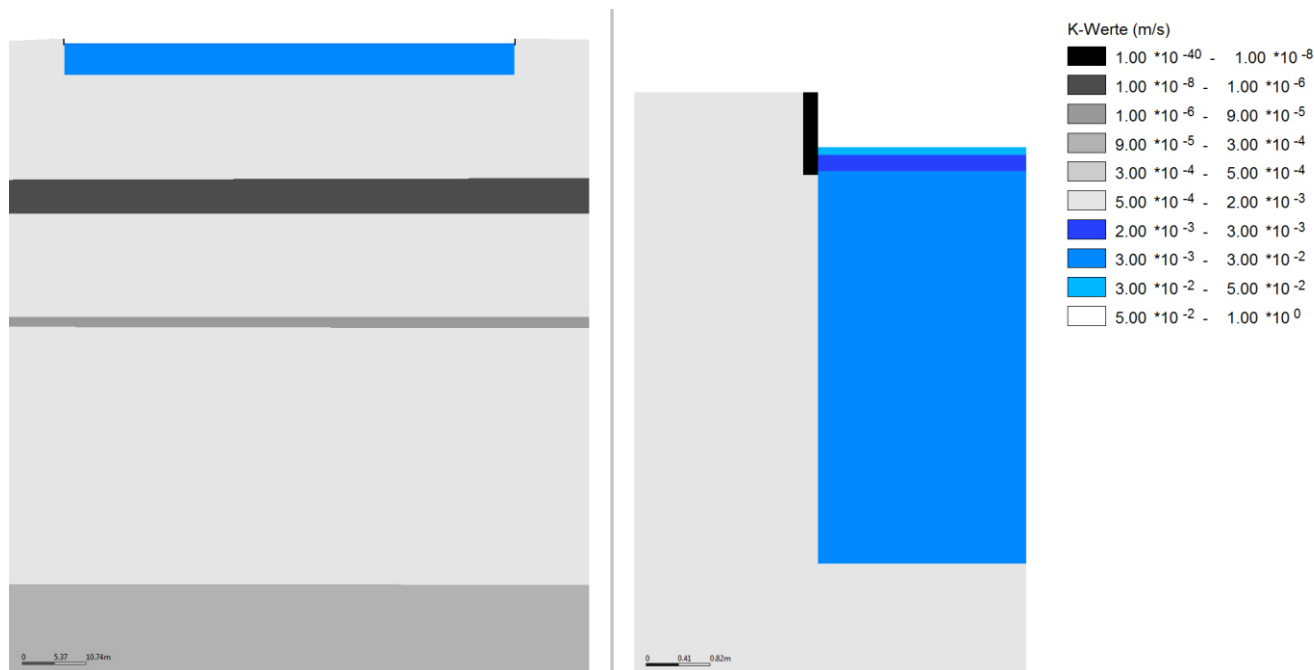


Abbildung 8-7: Darstellung der Durchlässigkeit im Nahbereich des Sickerschlitgrabens

Wie auch schon beim vorherigen Modell wird nach der Zuweisung der  $k_f$ -Werte eine weitere Schichtteilung durchgeführt, um im Nahbereich der Infiltrationsorgane eine feine Diskretisierung zu erhalten. Im direkten Einflussbereich der Organe wird die maximale Mächtigkeit der Elementschichten auf 20 cm festgelegt, welche ab der Endteufe des Organs 4 schrittweise erhöht wird. In Anlage E sind in Tabelle E-8 alle notwendigen Werte zu den Elementschichten hinterlegt. Das Modell des Sickerschlitgrabens besteht aus 74 Knotenschichten und 73 Elementschichten. In Anlage D findet sich eine Darstellung der erzeugten Elementschichten im Nahbereich des Sickerschlitgrabens (s. Abbildung D-26) und des Kiesbohrlochs D des Infiltrationsorgans 1 (s. Abbildung D-28), wobei jeweils links die Schichteinteilung ausschließlich durch die Zwangspunkte zu sehen ist und rechts die finale Schichteinteilung.

Nach der Schichteinteilung können alle weiteren notwendigen Attribute den Knoten bzw. den Finite-Elementen zugewiesen werden. Für die beiden Potentialränder des Modellgebiets liegen die Werte bei 89 müNN für die Ostgrenze und bei 86,8 müNN für die westliche Abgrenzung. Wie bei dem Modell des Jägersburger Waldes ist auch hier der Wert für die Westgrenze ein abgeschätzter Wert, der während der Kalibrierung des Modells überprüft und ggf. angepasst wird. Die Werte für die Grundwasserneubildung wiederum werden aus dem großräumigen Modell der BGS UMWELT für das Hessische Ried entnommen und den entsprechenden Elementen zugewiesen. Es ergeben sich daher Werte zwischen 40 mm/a und 220 mm/a und damit teilweise doppelt so hohe Werte wie im Jägersburger Wald. Eine Übersicht über die Verteilung der Grundwasserneubildung im Modellgebiet findet sich in Anlage D mit Abbildung D-29 wieder. Die Werte für die Porosität der einzelnen Medien werden wie zuvor mit 0,2 bzw. 1 für den Einstaubereich definiert.

Auch bei diesem Modell werden zunächst mittlere Infiltrationsmengen von etwa 45 m<sup>3</sup>/h pro Organ zugewiesen. Den Brunnen werden die Entnahmemengen zugewiesen, die für die Ermittlung der Richtwerte verwendet wurden. Mit dem Attribut GLEI werden die Fördermengen der Brunnen gleichmäßig auf die Knoten aufgeteilt, die innerhalb der Filterstrecke liegen. Die Brunnen des Wasserwerks Allmendfeld haben eine Filterstrecke von 40 m, welche etwa 55 muGOK beginnt. Da für die Brunnen der Stadt Gernsheim keine Ausbaupläne zur Verfügung stehen, wird hier die Entnahme ebenfalls in eine Tiefe von etwa 55 muGOK festgesetzt.

Im Sickerschlitgrabens ist als Wassereinlauf auf der Filterschicht ein geschlitztes Rohr eingebaut, wodurch eine möglichst gleichmäßige Beschickung des Grabens ermöglicht werden soll. Um die Modellierung zu vereinfachen, wird dieses Rohr nicht im Modell berücksichtigt. Die Wasserverteilung wird innerhalb des Grabens über die Zuweisung des Attributs GLEI umgesetzt: Je nach Infiltrationsmenge werden für die Knoten gleiche Potentiale definiert, sodass im Einlaufbereich ein gleichmäßiger Überstau entsteht, der ggf. nach einigen Metern gegen Null abflacht.

### 8.3 Analyse der für die Kalibrierung sensitiven Parameter

Auch bei diesem Modell wird zunächst überprüft, ob das erstellte Modell plausible Ergebnisse liefert oder ob Fehler beim Modellaufbau gemacht wurden. Zunächst wird eine einfache stationäre Strömungsrechnung ohne Infiltrations- und ohne Fördermengen durchgeführt, wobei die gleichen Einstellungen für die Berechnung verwendet werden wie bereits zuvor beschrieben. In Abbildung G-2 in Anlage G ist das Ergebnis der Strömungsmodellierung in Form von Grundwassergleichen an der freien Oberfläche zu sehen. Zusätzlich sind das Finite-Element-Netz und die  $k_f$ -Werte farblich dargestellt, der kleinere Bereich hat einen Wert von  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s und der größere einen Wert von  $5,25 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die Grundwassergleichen verlaufen gleichmäßig und das Grundwasser fließt vom Ostrand in Richtung des Westrandes. Da keine Unregelmäßigkeiten bei den Gleichen auftreten, kann davon ausgegangen werden, dass keine groben Fehler bei der Modellerstellung gemacht wurden.

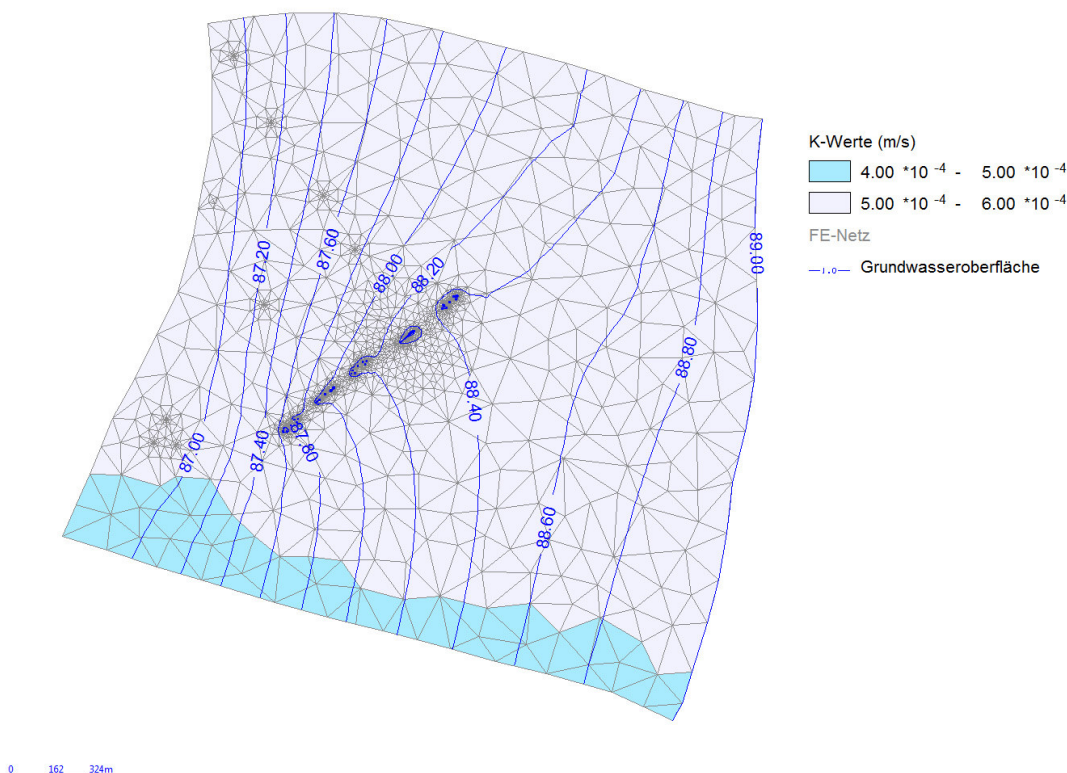


Abbildung 8-8: Simulierte Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald mit Infiltrations- und Fördermengen



Zusätzlich wird eine einfache stationäre Strömungsberechnung mit Infiltrations- und Fördermengen durchgeführt. Hierbei wurde auf Grundlage der Grundinfiltration von 3,0 Mio. m<sup>3</sup>/a für den Gernsheimer Wald die Infiltrationsmenge für die einfache stationäre Strömungsmodellierung festgelegt. Für die Kiesbohrlöcher bedeutet dies eine Infiltrationsmenge von etwa 2,5 m<sup>3</sup>/h pro Bohrloch, wobei am Organ 4 aufgrund der geringeren Anzahl an Bohrlöchern eine Menge von 3,7 m<sup>3</sup>/h pro Bohrloch resultiert. Der Sickerschlitgrabens weist eine Infiltrationsmenge von etwa 18,3 m<sup>3</sup>/h. Die Werte der Fördermengen der im Modellgebiet gelegenen Entnahmebrunnen entsprechen den Werten, die auch für die Festlegung der Richtwerte verwendet wurden. Bei den Brunnen der Stadt Gernsheim weisen nur die Brunnen I und II eine Fördermenge auf, für den Brunnen III ist keine Entnahme berücksichtigt. Die Förderung beläuft sich insgesamt auf etwa 1,1 Mio. m<sup>3</sup>/a, was der wasserrechtlich erlaubten jährlichen Fördermenge entspricht. Die Brunnen 5 - 9 des Wasserwerks Allmendfeld weisen eine jährliche Entnahmemenge zwischen 650.000 m<sup>3</sup> und 860.000 m<sup>3</sup> auf. Eine Auflistung der genauen Fördermengen ist in Tabelle E-9 in Anlage E hinterlegt. Das Ergebnis der einfachen stationären Strömungsberechnung ist in Abbildung 8-8 auf der vorherigen Seite zu sehen. Der Einfluss der Infiltration ist auch hier durch eine örtliche Aufhöhung des Grundwasserstands zu erkennen, wobei ein größerer Einfluss der Infiltration zu erkennen ist als beim Modell der Kiesbohrlöcher. Dies ist auf die unterschiedlichen Randbedingungen zurückzuführen. Beim gewählten Abstand der Grundwassergleichen ist nur ein geringer Einfluss der Fördermenge an den Brunnen der Stadt Gernsheim zu erkennen. Auch hier sind keine Unregelmäßigkeiten ersichtlich, sodass davon ausgegangen werden kann, dass bei der Implementierung der Infiltrationsorgane keine groben Fehler gemacht wurden.

### 8.3.1 Strömungsverhältnisse

Nachfolgend wird eine grundlegende Betrachtung der Strömungsverhältnisse an dem Sickerschlitgrabens durchgeführt. In der folgenden Abbildung 8-9 sind die resultierenden Druckverhältnisse für eine Infiltrationsmenge von 100 m<sup>3</sup>/h in einem Vertikalschnitt des Sickerschlitgrabens dargestellt. Die Beschickung erfolgt hierbei auf der rechten Seite des Grabens in der Darstellung. Die Bereiche unterschiedlicher Durchlässigkeitsbeiwerte sind farblich markiert: Die Kiesverfüllung des Sickerschlitgrabens bis zur Endteufe ist in gelb gekennzeichnet, das Anstehende in orange und die Bauwerkswand in schwarz. Die Potentiallinien sind in einem Abstand von 5 cm abgebildet. In der oberen Abbildung ist der Graben über seine Gesamtlänge von 75 m zu sehen und in der unteren ein Ausschnitt aus dem Einlaufbereich.

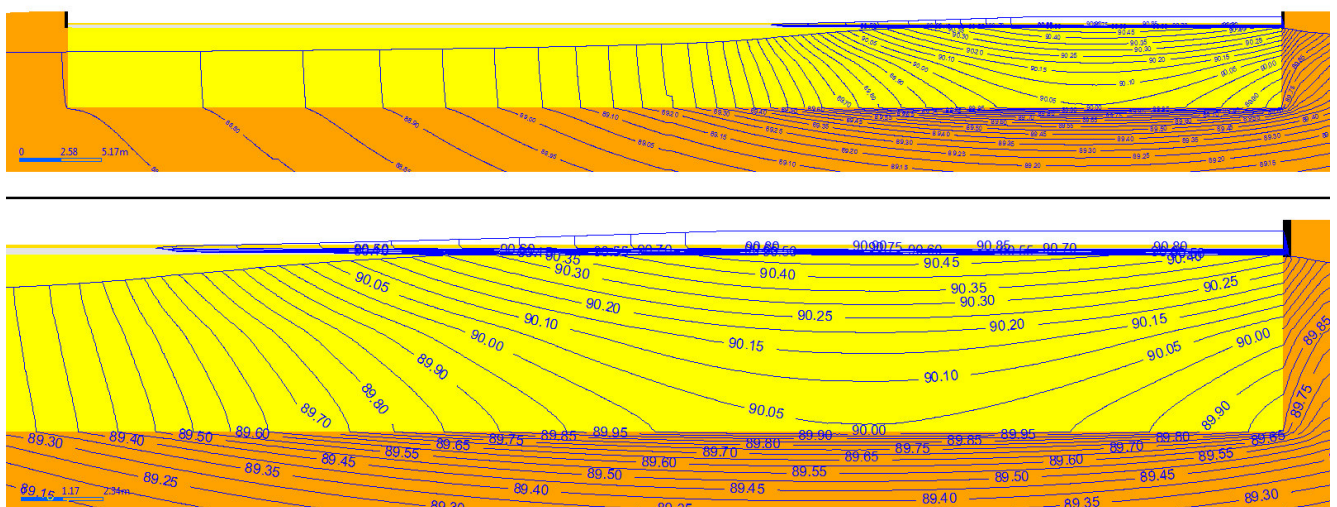


Abbildung 8-9: Resultierende Druckverteilung bei einer Infiltrationsmenge von 100 m<sup>3</sup>/h

Es ist zu erkennen, dass sich nur im ersten Drittel des Sickerschlitgrabens ein Wasserüberstau einstellt, mit einer maximalen Überstauhöhe von 20 cm. Dies deckt sich mit Beobachtungen in der Infiltrationspraxis. In der unteren Abbildung zusätzlich zu erkennen ist die Filtersandschicht in grau



und die 10 cm mächtige Filterkiesschicht darüber in orange. Die Infiltrationsmenge bestimmt maßgeblich die Druckverteilung innerhalb des Sickerschlitgrabens: Je mehr Wasser infiltriert wird, desto höher staut sich das Wasser und bildet eine längere Überstaufläche. Dabei findet aufgrund des geringeren Durchlässigkeitsbeiwerts der Filtersandschicht der Potentialabbau zum Großteil in dieser Schicht statt. Das Anstehende weist bei dieser Betrachtung einen um etwa eine Zehnerpotenz geringere Durchlässigkeit auf als die Kiesverfüllung des Grabens. Dadurch findet am Übergang zum Anstehenden ebenfalls ein deutlicher Potentialabbau statt.

Anhand des Verlaufs der Potentiallinien kann auf die Fließrichtung des Wassers rückgeschlossen werden. Im Bereich des Einstaus durchströmt das Infiltrationswasser den Sickerschlitgrabenn annähernd vertikal. Unter dem Bereich des Sickerschlitgrabens, in dem der Überstau abnimmt, ändert sich die Fließrichtung von zunächst vertikal nach horizontal. Der Abstand zwischen den Potentiallinien lässt Rückschlüsse auf die Fließgeschwindigkeiten zu: Je näher die Potentiallinien beieinander liegen, desto höher ist die Fließgeschwindigkeit. Demnach liegen die Geschwindigkeiten im Einlaufbereich höher als im hinteren Bereich des Sickerschlitgrabens. Eine Darstellung der resultierenden Abstandsgeschwindigkeiten im Einlaufbereich des Grabens bei einer Infiltrationsmenge von 100 m<sup>3</sup>/h ist mit der folgenden Abbildung 8-10 gegeben. Es ist zu erkennen, dass direkt am Einlauf im oberen Bereich der Verfilterung die höchsten Geschwindigkeiten von bis zu 24 m/h erreicht werden. Mit der Tiefe des Grabens nimmt die Abstandsgeschwindigkeit ab. Im Aquifer liegt die Fließgeschwindigkeit anschließend bei maximal 2 m/h.

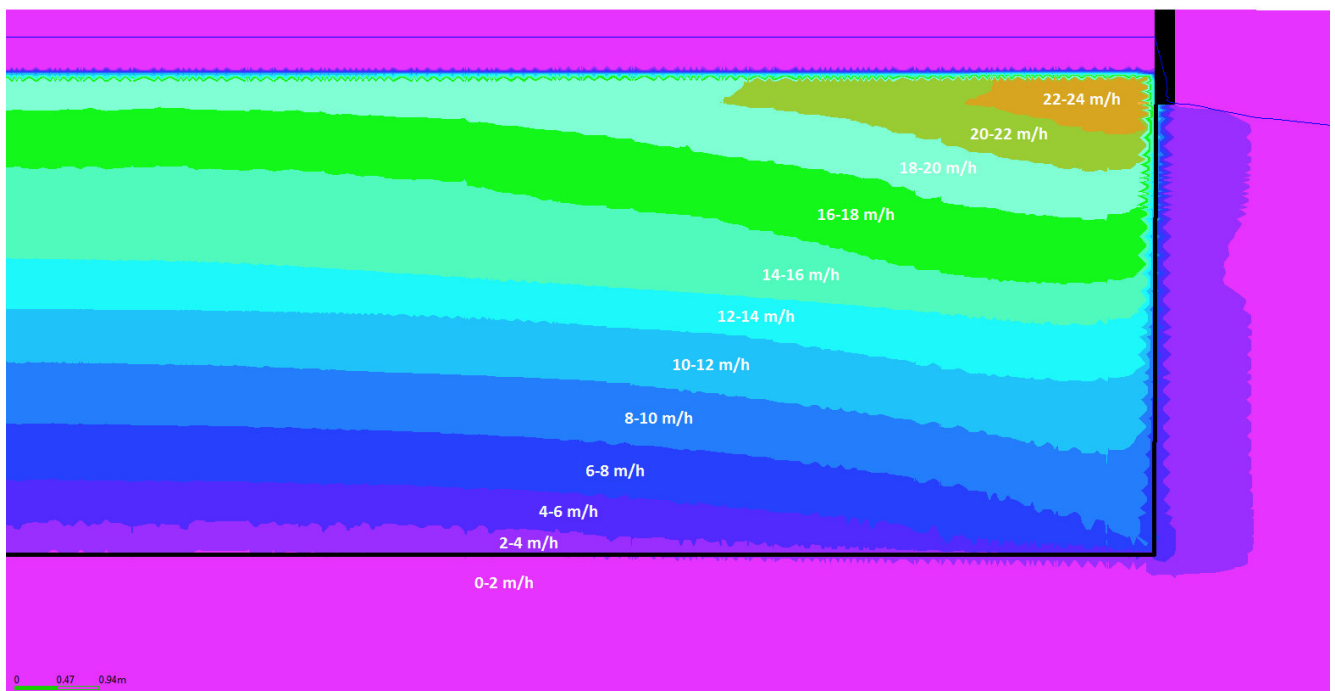


Abbildung 8-10: Resultierende Abstandsgeschwindigkeiten im Einlaufbereich des Sickerschlitgrabens

Die zuvor beschriebene Fließrichtung wird durch die Darstellung der Schlieren im Einlaufbereich in Abbildung 8-11 auf der folgenden Seite veranschaulicht. Deutlich zu erkennen ist die vertikal gerichtete Fließrichtung innerhalb des Sickerschlitgrabens sowie eine Änderung dieser Richtung im Übergang zum Anstehenden.

Auch am Sickerschlitgrabenn kann durch eine ausreichend geringe Durchlässigkeit der Filtersandschicht ein Abreißen der Strömung resultieren und somit zu einer Entkopplung der Strömungsverhältnisse führen. Ein Vergleich zwischen gekoppelten und entkoppelten Verhältnissen ist mit Abbildung 8-12 auf der folgenden Seite gegeben. Durch eine Ausweitung der Überstaufläche aufgrund der deutlich größeren Infiltrationsoberfläche kann eine Verringerung der Infiltrationsleistung verhindert werden. Dies ist ebenso in Abbildung 8-12 zu sehen. Bei beiden Varianten wird eine Menge

von etwa 100 m<sup>3</sup>/h infiltriert, aufgrund des geringeren Durchlässigkeitsbeiwertes der Filtersandschicht in der unteren Abbildung bildet sich eine größere Überstaulänge bei gleichbleibender Überstauhöhe aus.

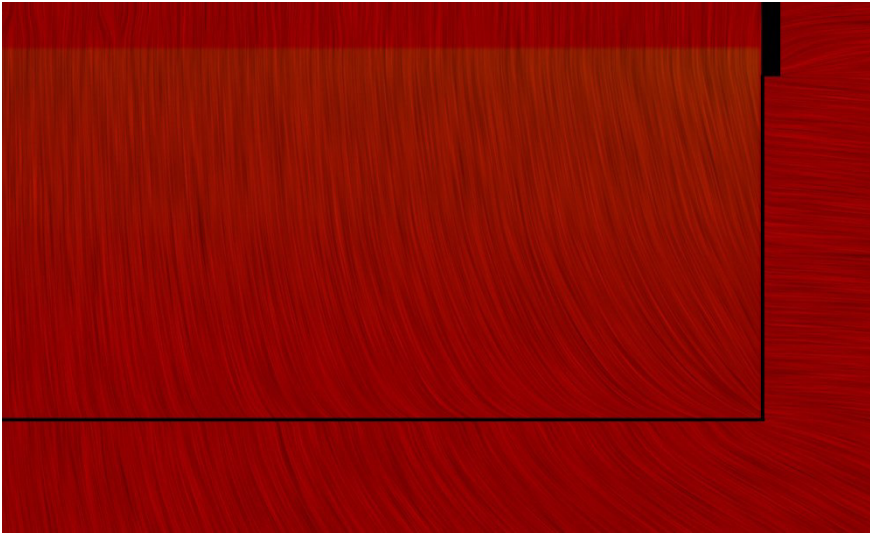


Abbildung 8-11: Schlierendarstellung im Einlaufbereich des Sickerschlitgrabens

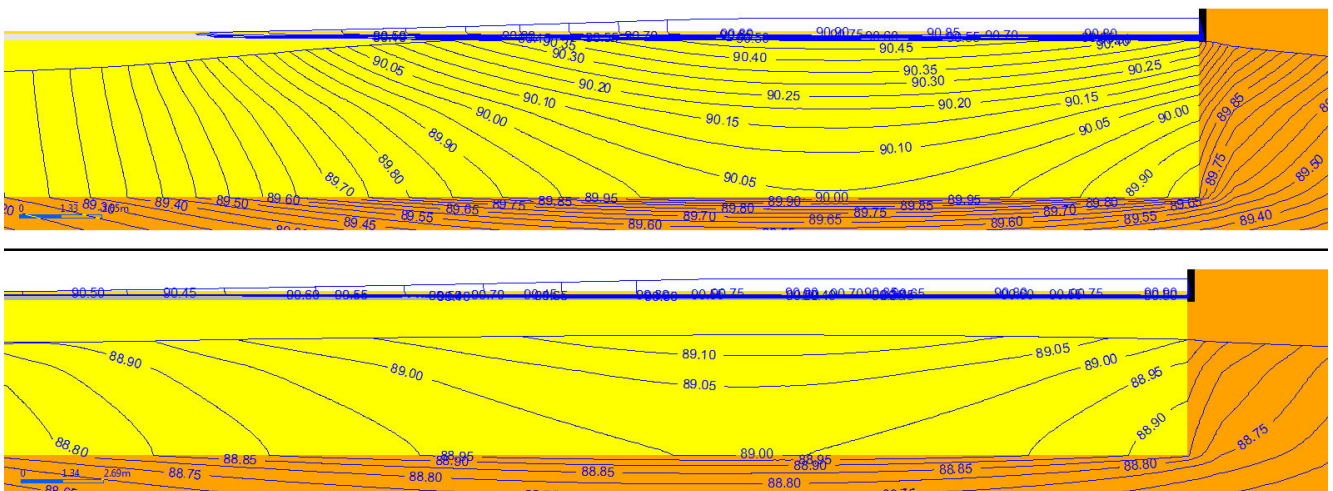


Abbildung 8-12: Darstellung der gekoppelten (oben) und entkoppelten Strömungsverhältnisse (unten)

### 8.3.2 Parametervariation

Anschließend wird mit der Parametervariation begonnen, bei der die für die Kalibrierung des Sickerschlitzmodells relevanten Parameter untersucht werden. Dazu zählen die Durchlässigkeit (Filtermaterial und Anstehendes) und der Grundwasserstand. Die Werte für den Grundzustand dieser Betrachtung sind in Tabelle 8-3 auf der folgenden Seite aufgelistet. Dabei ist wie bereits beim Modellaufbau beschrieben mit Filterkies 1 die 10 cm mächtige Filterkiesschicht oberhalb des Filtersandes bezeichnet und mit Filterkies 2 die Kiesverfüllung bis zur Endteufe. Der festgelegte Grundwasserstand beläuft sich hierbei auf mittlere Werte. Mit den Parameterwerten des Grundzustands werden ein maximaler Einstau von 0,35 m und eine Länge des Wassereinstaus von etwa 45,4 m erreicht.

Wie bereits bei der Parametervariation im vorherigen Kapitel werden auch hier die Parameter systematisch verändert und deren Auswirkung auf die Überstaulänge und –höhe sowie auf die Druckverhältnisse im Inneren des Sickerschlitzgrabens dokumentiert. In Tabelle 8-4 auf der folgenden Seite sind einige Ergebnisse dieser Untersuchung aufgelistet. Eine ausführliche Dokumentation der

Ergebnisse findet sich mit verschiedenen Tabellen in Anlage G wieder. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Einstauhöhe und –länge müssen die resultierenden Werte für diese beiden Parameter unter gegenseitiger Berücksichtigung bewertet werden. Für die Druckverhältnisse ist die Änderung des Wasserstands an der Rammfilterlanze A1 in der Tabelle aufgetragen. Die Werte für den Grundwasserstand beziehen sich auf das Potential am östlichen Modellrand.

Tabelle 8-3: Parameterwerte des Grundzustands für die Sensitivitätsanalyse des Sickerschlitgrabens

Parameter	Grundzustand	Einheit
$k_f$ -Wert Filterskies 1	$4,6 \cdot 10^{-2}$	[m/s]
$k_f$ -Wert Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$	[m/s]
$k_f$ -Wert Filterkies 2	$2,0 \cdot 10^{-2}$	[m/s]
$k_f$ -Wert Aquifer	$5,25 \cdot 10^{-4}$	[m/s]
Infiltrationsmenge	100	[m³/h]

Tabelle 8-4: Ergebnisse der Parametervariation

Parameter	Startwert	Simulationswert	$\Delta$ Länge	$\Delta$ Überstau	$\Delta$ Wasserstand A1
	[-]	[-]	[m]	[m]	[müNN]
$k_f$ -Wert Filterkies 1	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$9,2 \cdot 10^{-2}$ m/s	0,3	-0,02	-0,01
	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$2,3 \cdot 10^{-2}$ m/s	1,3	0,01	0,01
$k_f$ -Wert Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s	$5,8 \cdot 10^{-3}$ m/s	0,4	0,00	0,03
	$2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s	$1,45 \cdot 10^{-3}$ m/s	3,2	0,00	-0,03
$k_f$ -Wert Filterkies 2	$2,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	$3,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	-0,4	-0,03	0,00
	$2,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	$1,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	5,2	0,07	0,01
$k_f$ -Wert Aquifer	$5,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	$6,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	-10,1	0,00	-0,17
	$5,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	$4,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	19,1	0,41	0,43
Grundwasserstand	89 müNN	89,5 müNN	29,6	0,30	-0,32
	89 müNN	88,5 müNN	-21,6	0,26	-0,02
Infiltrationsmenge	100 m³/h	112,5 m³/h	13,0	0,24	0,25
	100 m³/h	87,5 m³/h	-16,1	-0,02	-0,03

Bei den betrachteten Randbedingungen wirkt sich eine Veränderung der Durchlässigkeit der oberen Filterkiesschicht sowie der Filtersandschicht nur sehr gering auf die betrachteten Parameter aus. Lediglich die Überstaulänge erfährt bei einer Verringerung der Durchlässigkeit beider Schichten eine nennenswerte Vergrößerung. Die Auswirkungen der Durchlässigkeit der Kiesverfüllung sind hierbei vergleichsweise größer im Hinblick auf die Überstaulänge und –höhe. Den größten Einfluss auf diese beiden Parameter weist jedoch der Grundwasserstand auf, wobei eine Verringerung der Durchlässigkeit des Aquifers ebenfalls einen deutlichen Einfluss hat. Hierbei sei zu erwähnen, dass bei der Untersuchung des Einflusses der Durchlässigkeit des Aquifers die Infiltrationsmenge von 100 m³/h auf 80 m³/h reduziert wurde, da ohne diese Reduzierung das Wasser im Sickerschlitgrabens bei der Verringerung der Durchlässigkeit übergelaufen ist.

Wie bereits beschrieben bestimmt auch die Infiltrationsmenge maßgeblich die Länge und die Höhe des Überstaus. Die Durchlässigkeitswerte der Filterschichten scheinen bei dieser Betrachtung keinen maßgeblichen Einfluss auf die Druckverhältnisse im Inneren des Sickerschlitgrabens zu haben. Eine Veränderung der anderen drei Parameter, Durchlässigkeit des Aquifers, Grundwasserstand und Infiltrationsmenge, wirken sich zum Teil deutlich stärker aus.

---

Hierbei sei zu erwähnen, dass es aufgrund der Oszillation der Iterationsergebnisse der Strömungssimulation und von Ungenauigkeiten in der Darstellung der Simulationsergebnisse sowie bei der Bestimmung der resultierenden Werte über diese Darstellung zu Abweichungen kommen kann. Dem resultierenden Wasserstand kann demnach bspw. ein Fehlerbereich von ca.  $\Delta 5$  cm zugewiesen werden. Des Weiteren steht der Wasserstand an der Rammfilterlanze A1 nicht repräsentativ für die resultierenden Werte an den anderen Rammfilterlanzen. Eine Verringerung der Überstauhöhe bei gleichzeitiger Vergrößerung der Überstaulänge kann bspw. zu einer Verringerung des Wertes an Lanze A1, jedoch zu einer Vergrößerung an Lanze B1 führen. Abhängig von den aus der Kalibrierung resultierenden Durchlässigkeitsbeiwerten für die Filterschichten kann sich zudem die Bedeutung dieser Schichten auf die in diesem Abschnitt untersuchten Parameter ändern. Eine weiterführende Betrachtung wird in Kapitel 8.5 durchgeführt.

## **8.4 Kalibrierung und Validierung**

In diesem Kapitel wird das Modell des Sickerschlitgrabens mit Daten aus dem Infiltrationsversuch aus 2012 kalibriert. Die aus der Kalibrierung resultierenden Werte werden anschließend mit unabhängigen Datensätzen validiert. Zunächst erfolgt jedoch, wie beim Modell der Kiesbohrlöcher, eine großräumige Kalibrierung.

### **8.4.1 Großräumige Kalibrierung**

Auch beim Modell im Bereich des Gernsheimer Waldes wird zunächst mit der großräumigen Kalibrierung begonnen. In Abbildung 8-13 auf der folgenden Seite sind die sich durch die einfache stationäre Strömungsmodellierung ergebenden Grundwassergleichen (blau) sowie die Gleichen der Richtwerte (rot) dargestellt. Auch für dieses Modell wurde den Infiltrationsorganen die Infiltrationsmenge zugewiesen, die auch für die Erstellung der Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplans berücksichtigt wurden. Die Grundinfiltration von 3,0 Mio. m<sup>3</sup>/a für alle 18 Infiltrationsanlagen des Gernsheimer Waldes wird gleichmäßig aufgeteilt, wonach für die einzelnen Organe eine Menge von 160.000 m<sup>3</sup>/a angenommen wird. Für die Entnahmebrunnen werden ebenso die Fördermengen angesetzt, die für die Festlegung der Richtwerte verwendet wurden.

In Abbildung 8-13 auf der folgenden Seite sind mit roten Punkten die zwei in unmittelbarer Nähe zum Modellgebiet liegenden Grundwassermessstellen markiert, für die Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried vorliegen. Die im Gebiet liegende Messstelle weist einen Richtwert von 87,6 müNN auf und die außerhalb liegende einen Wert von 87,8 müNN. Die berechnete Grundwassergleiche mit dem Wert 89,0 müNN ist deckungsgleich mit der, die aus den Richtwerten folgt, da deren Wert als Randbedingung für die Ostabgrenzung definiert ist. Die darauf folgende simulierte Gleiche mit dem Wert 88,5 müNN gleicht sich am nördlichen Modellrand gut der maßgebenden Gleiche an, wird aber in Richtung Süden aufgrund der Infiltration abgelenkt. Ebenfalls durch die Infiltration beeinflusst liegt die Grundwassergleiche mit dem Wert 88,0 müNN deutlich weiter stromabwärts. Die Position der darauf folgenden beiden Gleichen ist hingegen hinreichend genau.

Aufgrund der deutlich feineren Diskretisierung im Bereich der Infiltrationsorgane kann der Einfluss der Infiltration in Form der resultierenden Grundwassergleichen genauer dargestellt werden. Dies ist bei den Gleichen der Richtwerte nicht der Fall. Zudem wurden die Gleichen auf der Grundlage der für einzelne Messstellen festgelegten Richtwerte erstellt, sodass örtlich ohne unmittelbare Nähe zu einer dieser Messstellen abweichende Werte zu erwarten sind. Aus diesem Grund und auf der Basis, dass abgesehen von dem Einfluss der Infiltration die berechneten Grundwassergleichen die der Richtwerte hinreichend wiedergeben, ist eine großräumige Kalibrierung in Form einer Anpassung der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters nicht notwendig. Darüber hinaus liegt aufgrund der gegebenen Durchlässigkeit aus dem großräumigen Modell der BGS UMWELT für das Hessische Ried keine ausreichende Möglichkeit vor, durch eine Änderung dieser Werte die Grundwassergleichen anzupassen



ohne Bereiche neuer  $k_f$ -Werte zu erzeugen. Dies zeigt auch Abbildung 8-14, wobei hier an zwei Stellen die Durchlässigkeit so geändert wurde, dass sich die simulierten Gleichen denen der Richtwerte anpassen. Da diese Änderung allerdings lediglich der Anpassung der Gleichen dient, jedoch nicht auf einer Datengrundlage basiert, wird diese Änderung der Durchlässigkeit nicht weiter verfolgt.

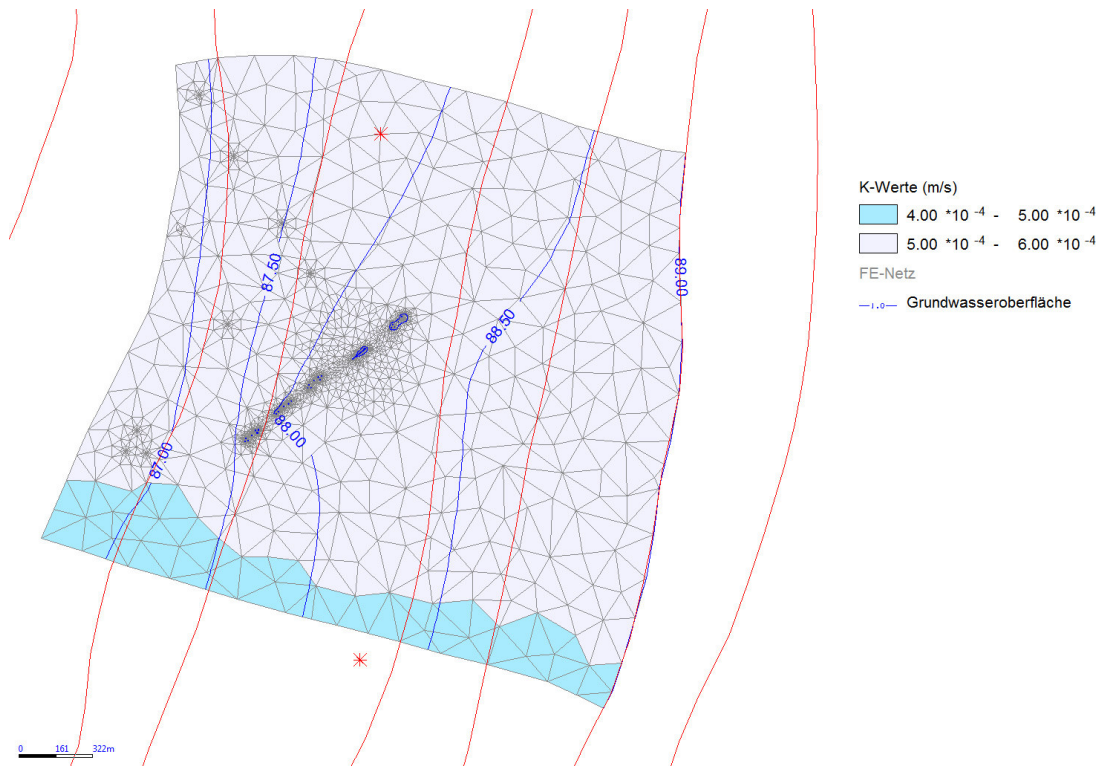


Abbildung 8-13: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald (1)

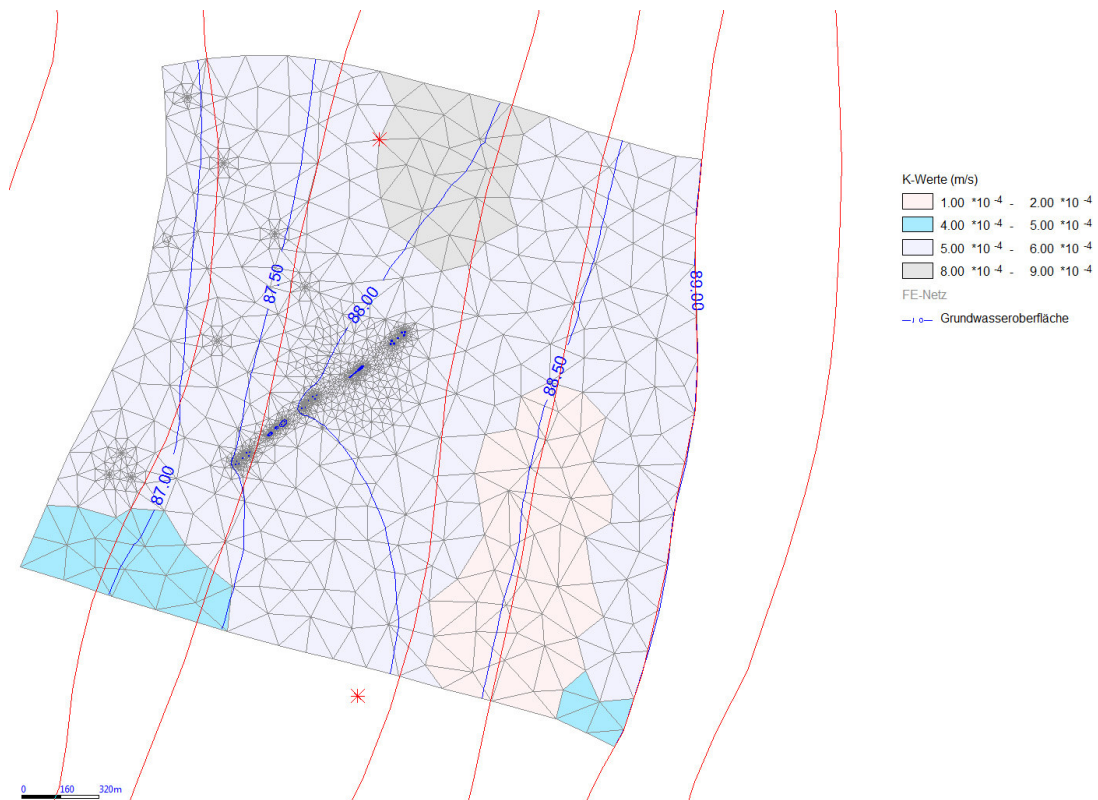


Abbildung 8-14: Vergleich der Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald (2)



## 8.4.2 Kalibrierung im Nahbereich

Anschließend folgt die Kalibrierung im Nahbereich des Sickerschlitgrabens, für die ein Datensatz aus dem Infiltrationsversuch aus dem Jahr 2012 verwendet wird. Anknüpfend an die Ergebnisse aus der Kalibrierung des Modells der Kiesbohrlöcher, wurde hierbei zunächst versucht, die Kalibrierung unter Berücksichtigung der Temperatur des Infiltrationswassers mit einer stationären Wärmetransportrechnung durchzuführen. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass der Arbeitsspeicher des für die Simulation verwendeten Computers nicht ausreichend ist. Auch eine deutliche Vergrößerung des Finite-Element-Netzes konnte das Problem nicht beheben. Der Sickerschlitgrabens unterscheidet sich von den Kiesbohrlöchern vor allem in der deutlich größeren Infiltrationsoberfläche. Hieraus resultieren auch mehr von der punktuellen Wärmeaufgabe im Modell direkt betroffene Finite-Elemente, für die eine Temperatur berechnet werden muss. Aufgrund dieses Unterschiedes wird vermutlich für die Wärmeausbreitung innerhalb des Sickerschlitgrabens eine deutlich höhere Kapazität benötigt. Da diese Problematik nicht behoben werden konnte, wird die Kalibrierung des Modells durch eine einfache stationäre Strömungssimulation kalibriert.

Für die Kalibrierung wird der Datensatz vom 6. Oktober mit einer Infiltrationsmenge von 180 m<sup>3</sup>/h gewählt. Dies stellt die während des Versuchs maximal erfolgte Infiltrationsmenge dar. In Tabelle 8-5 sind die aus der Kalibrierung resultierenden Durchlässigkeitsbeiwerte für die Filterschichten und den Aquifer aufgelistet, inklusive der Ausgangswerte. Zur Erreichung der gemessenen Wasserstände in den Rammfilterlanzen wurde die Durchlässigkeit der Filtersandschicht sowie des Filterkieses 2 verringert und die des Aquifers erhöht. Der Wert für den Filterkies 1 bleibt unverändert. Da für eine einfache stationäre Strömungssimulation die Temperatur des Infiltrationswassers nicht berücksichtigt wird, sei darauf hingewiesen, dass sich in der Realität ggf. andere Werte für die Durchlässigkeit der Filterschichten und des Aquifers ergeben würden.

Tabelle 8-5: Resultierende Durchlässigkeitsbeiwerte aus der Kalibrierung

	Ausgangs-k <sub>f</sub> -Wert	k <sub>f</sub> -Wert kalibriert
	[m/s]	[m/s]
Filterkies 1	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Filterkies 2	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Aquifer	$5,25 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$

Bei der Kalibrierung dienen die gemessenen Grundwasserstände an den Rammfilterlanzen als einzige Orientierung für die Durchlässigkeitswerte der Filterschichten und des Anstehenden, da für den Infiltrationsversuch keine Daten über die maximale Überstauhöhe oder -länge vorliegen. In der folgenden Tabelle sind die gemessenen und die mit den kalibrierten Werten simulierten Wasserstände aufgelistet. Abgesehen vom Wasserstand an der Rammfilterlanze B2 weichen die simulierten Werte maximal um Δ0,05 m vom gemessenen Wert ab. Diese maximale Abweichung von Δ0,05 m wurde dabei zuvor als Kalibrierungsziel festgelegt.

Tabelle 8-6: Wasserstandsergebnisse der Kalibrierung

	A1	A2	B1	B2	C2
	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
gemessen	90,48	90,33	90,53	90,31	90,28
simuliert	90,44	90,38	90,50	90,45	90,26

### 8.4.3 Validierung

Mit zwei Datensätzen aus dem Infiltrationsversuch werden die aus der Kalibrierung gewonnenen Werte für die Durchlässigkeit der Filterschichten und des Anstehenden verifiziert. Dazu werden die Datensätze vom 10. August mit einer Infiltrationsmenge von 50 m<sup>3</sup>/h und vom 2. September mit 120 m<sup>3</sup>/h gewählt. Im Hinblick auf den Infiltrationsversuch stellen diese Werte die minimale und eine mittlere Infiltrationsmenge dar. In der folgenden Tabelle 8-7 sind die gemessenen Werte den simulierten Werten gegenüber gestellt. Bei dem Datensatz mit einer Menge von 120 m<sup>3</sup>/h weichen die Wasserstände maximal 9 cm voneinander ab. Bei dem anderen Datensatz weicht der simulierte Wert an der Rammfilterlanze A2 mit 24 cm stärker vom gemessenen Wert ab. Die Werte an den anderen Rammfilterlanzen liegen jedoch in einem Bereich von maximal 11 cm. Auf dieser Grundlage können die aus der Kalibrierung gewonnenen Werte für die Durchlässigkeit als vertrauenswürdig angesehen werden.

Tabelle 8-7: Wasserstandsergebnisse der Validierung

	A1	A2	B1	B2	C2
	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
120 m <sup>3</sup> /h					
gemessen	90,04	89,89	90,00	89,78	89,14
simuliert	90,02	89,94	89,92	89,87	89,23
50 m <sup>3</sup> /h					
gemessen	89,10	88,94	88,75	88,75	88,52
simuliert	89,21	89,18	88,74	88,74	88,60

## 8.5 Identifizierung und Quantifizierung der auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden Parameter

Auf Basis der verifizierten Werte für die Durchlässigkeit der Filterschichten und des Aquifers werden anschließend die für die Infiltrationsleistung am Sickerschlitgrabens maßgebenden Parameter identifiziert und quantifiziert. Hierbei muss aufgrund der Problematik bei einer Wärmetransportrechnung auf eine Untersuchung des Einflusses der Temperatur des Infiltrationswassers verzichtet werden. Daher wird auf die Untersuchung der Wassertemperatur durch die Verwendung des Modells der Kiesbohrlöcher verwiesen, mit der bereits eine ausreichende Quantifizierung dieses Parameters durchgeführt wurde.

Anders als bei der Kalibrierung wird für die Untersuchung in diesem Kapitel eine Überstauhöhe von 20 cm auf einer Länge von 15 m vordefiniert. Die Infiltrationsmenge resultiert als Simulationsergebnis. Für diesen Grundzustand bei mittleren Grundwasserständen resultieren die in Tabelle 8-8 aufgeführten Werte. Es wird eine Infiltrationsmenge von etwa 100 m<sup>3</sup>/h erreicht.

Tabelle 8-8: Resultierende Werte des Grundzustands

res. Infiltrations- menge	Länge Wasserüberstau	A1	A2	B1	B2	C1	C2
[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
101,48	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83

### 8.5.1 Durchlässigkeit der Filterschicht

Auch wenn eine Kolmation der Filterschichten nicht direkt am Sickerschlitgrabens im Betrieb zu beobachten ist, wird anschließend der Einfluss der Durchlässigkeitsbeiwerte dieser Schichten untersucht. Dabei werden die aus der Kalibrierung gewonnenen Werte systematisch variiert und der

Einfluss dieser Variation auf die Infiltrationsmenge dokumentiert. Eine genaue Auflistung der Ergebnisse dieser Untersuchung findet sich in Anlage H wieder. In der folgenden Abbildung 8-15 sind die Ergebnisse in einem Diagramm dargestellt. Eine Veränderung der Durchlässigkeit der 10 cm mächtigen Filterkiesschicht (Filterkies 1) hat demnach keinen Einfluss auf die Infiltrationsleistung. Auch der Durchlässigkeitsbeiwert der Kiesverfüllung bis zur Endteufe (Filterkies 2) zeigt nur sehr geringe Auswirkungen auf die Infiltrationsleistung.

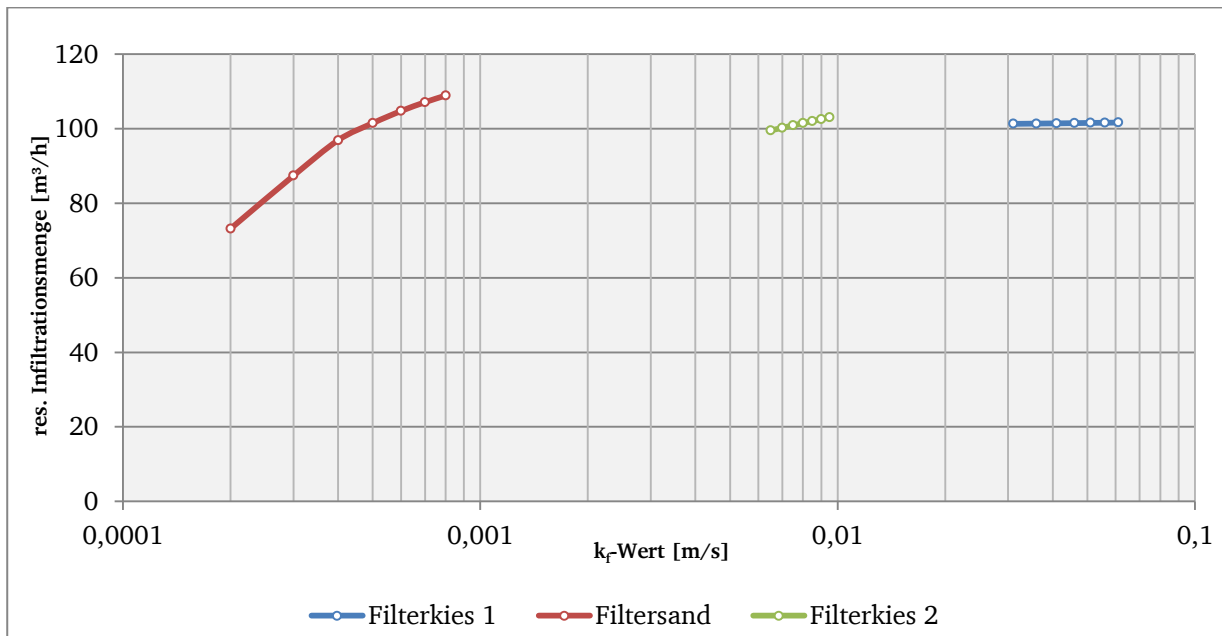


Abbildung 8-15: Auswirkungen des Durchlässigkeitsbeiwerts der Filterschichten auf die Infiltrationsmenge

Den größten Einfluss der Durchlässigkeit der drei Filterschichten auf die Infiltrationsleistung hat die Durchlässigkeit der Filtersandschicht. Verringert sich der Durchlässigkeitsbeiwert in Folge einer möglichen Kolmation von  $5,0 \cdot 10^{-4}$  m/s zu  $4,0 \cdot 10^{-4}$  m/s, so reduziert sich die Infiltrationsmenge um etwa 5 %. Zudem liegen ab einem Wert von  $3,0 \cdot 10^{-4}$  m/s entkoppelte Strömungsverhältnisse vor, wodurch sich die Infiltrationsmenge deutlich reduziert.

Anschließend wird untersucht, in welchem Ausmaß sich eine Entfernung des Filterkieses 1 und der Filtersandschicht auf die Infiltrationsleistung auswirken. Dabei wird zunächst eine Simulation ohne Filterkies 1 (FK1) durchgeführt und anschließend eine Simulation ohne Filterkies 1 und ohne Filtersandschicht (FS). Die Ergebnisse dieser Simulation finden sich in der unten stehenden Tabelle 8-9 wieder.

Tabelle 8-9: Einfluss auf die Infiltrationsleistung bei unterschiedlicher Filterschichtabfolge

	res. Infiltrations- menge	Länge Wasserüberstau	A1	A2	B1	B2	C1	C2
	[m³/h]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
-	101,48	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
Ohne FK1	99,78	31,7	90,10	90,02	89,23	89,23	88,82	88,82
Ohne FK1 und FS	121,20	25,6	90,49	90,40	89,45	89,45	88,99	88,99

Eine Entfernung der oberen Filterkiesschicht wirkt sich nur sehr gering auf die Infiltrationsmenge und die Druckverhältnisse im Inneren des Sickerschlitgrabens aus. Eine zusätzliche Entfernung der Filtersandschicht hingegen wirkt sich deutlich auf die resultierende Infiltrationsmenge aus. Zusätzlich findet in diesem Bereich aufgrund der geringen Durchlässigkeit kein Potentialabbau statt, sodass innerhalb des Kiesbohrlochs höhere Druckverhältnisse resultieren.

## 8.5.2 Fließgeschwindigkeiten

Die Filtergeschwindigkeit im Sickerschlitzzgraben hängt von der Infiltrationsmenge und der Infiltrationsfläche ab. Aufgrund der variierenden Überstaulänge resultieren unterschiedliche Werte für die Infiltrationsfläche. Bei dem betrachteten Grundzustand mit einer Infiltrationsmenge von rund 100 m³/h und einer Überstaulänge von etwa 30 m ergibt sich bei einer Breite des Grabens von 1 m eine Filtergeschwindigkeit von 3,3 m/h. Damit resultiert eine Abstandsgeschwindigkeit in der Filtersandschicht bei einer effektiven Porosität von 0,2 von 16,7 m/h bzw. für die Kiesschichten bei einer effektiven Porosität von 0,3 eine Abstandsgeschwindigkeit von 11,1 m/h.

$$v_f = \frac{Q}{A} = \frac{100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{1 \text{ m} \cdot 30 \text{ m}} = 3,33 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad (8.1)$$

$$v_{a,S} = \frac{v_f}{n_{\text{eff},S}} = \frac{3,33 \frac{\text{m}}{\text{h}}}{0,2} = 16,7 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad (8.2)$$

$$v_{a,K} = \frac{v_f}{n_{\text{eff},K}} = \frac{3,33 \frac{\text{m}}{\text{h}}}{0,3} = 11,1 \frac{\text{m}}{\text{h}} \quad (8.3)$$

In den Jahren 2014 bis einschließlich 2017 wurden monatlich regelmäßig Infiltrationsmengen von über 70.000 m³ erreicht (s. Abbildung 8-2 S. 74). Dies entspricht in etwa 100 m³/h. Bei einer gleichen Infiltrationsmenge am Organ 6 im Jägersburger Wald, das heißt 20 m³/h pro Bohrloch, wird eine deutlich höhere Filtergeschwindigkeit von 11,32 m/h bei den Bohrlöchern erreicht (s. Tabelle 7-16 S. 64). Damit liegen auch die resultierenden Abstandsgeschwindigkeiten bei den Bohrlöchern höher. Erst ab einer Infiltrationsmenge von etwa 5 m³/h pro Bohrloch werden die Fließgeschwindigkeiten, die am Sickerschlitzz bei 100 m³/h vorliegen, unterschritten.

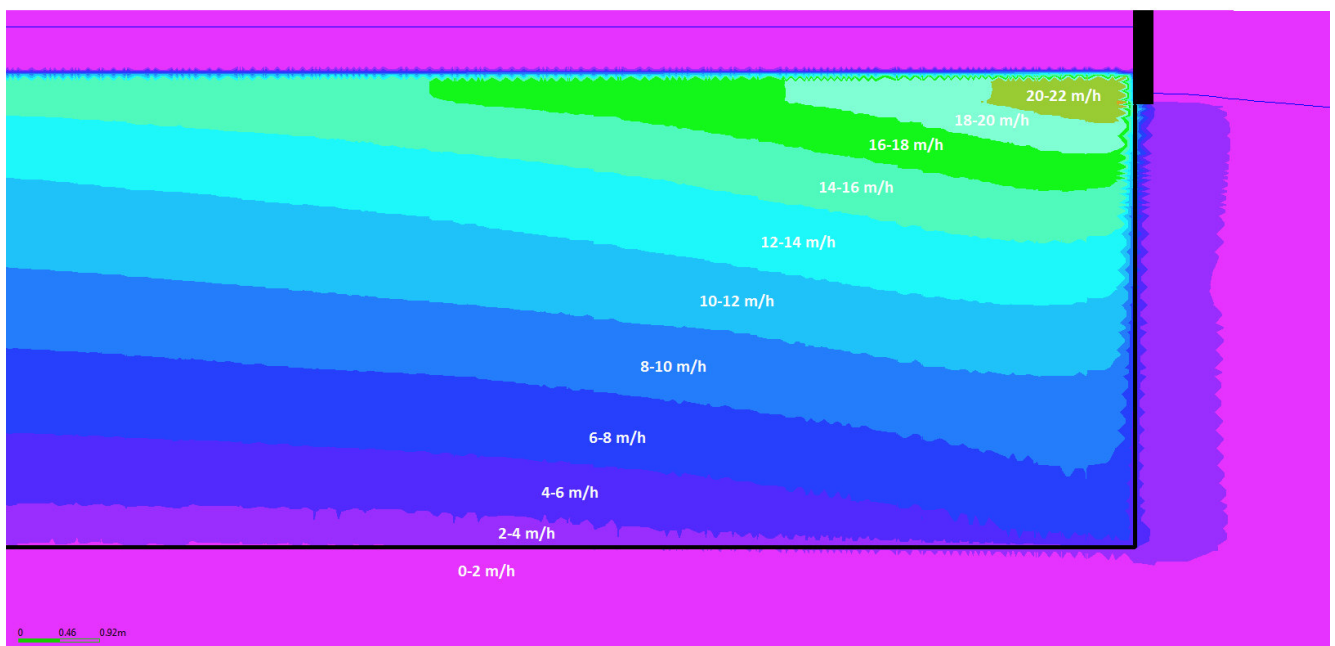


Abbildung 8-16: Resultierende Abstandsgeschwindigkeiten bei einer Infiltrationsmenge von 100 m³/h

Die bei einer einfachen stationären Strömungssimulation simulierten Abstandsgeschwindigkeiten für eine Infiltrationsmenge von 100 m<sup>3</sup>/h sind in Abbildung 8-16 auf der vorherigen Seite farblich markiert. Hierbei ergeben sich im Einlaufbereich maximale Geschwindigkeiten von 22 m/h, die damit höher als die zuvor berechneten Werte liegen. Da es bei den im Sickerschlitgrab vorliegenden Fließgeschwindigkeiten bisher nicht zu einer nennenswerten Kolmation der Filterschicht gekommen ist, kann diese für die Bemessung einer konstruktiven Verbesserung an den Kiesbohrlöchern als einzuhaltendes Kriterium dienen. Aufbauend auf die berechnete Abstandsgeschwindigkeit im Filtersand wird hierfür eine Geschwindigkeit von 13 m/h definiert. Dies entspricht einer zulässigen Filtergeschwindigkeit von 2,6 m/h.

### 8.5.3 Hydraulischer Gradient

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung des hydraulischen Gradienten auf die Infiltrationsleistung am Sickerschlitgrab untersucht. Da im Gegensatz zu den Kiesbohrlöchern an diesem Organ die Infiltrationsmenge nicht über die Überstauhöhe geregelt wird, wird die Überstauhöhe im Folgenden nicht weiter untersucht. Neben der Überstauhöhe bestimmt der Grundwasserstand maßgebend den hydraulischen Gradienten, sodass dieser systematisch variiert wird und die Simulationsergebnisse dokumentiert werden. Dabei beläuft sich die Änderung des Grundwasserstands auf  $\Delta 0,5$  m, der sukzessive in 0,1 m-Schritten verändert wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle H-9 in Anlage H aufgelistet sowie in Abbildung 8-17 in Form eines Diagramms dargestellt.

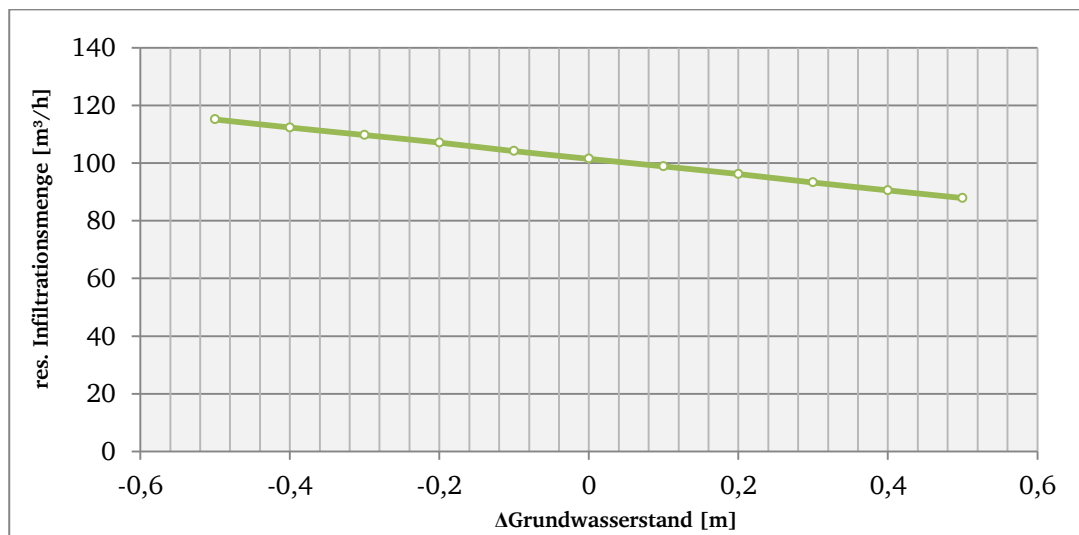


Abbildung 8-17: Auswirkungen des Grundwasserstands auf die Infiltrationsmenge

Zwischen dem Grundwasserstand und der Infiltrationsmenge besteht ein linearer Zusammenhang, der bereits bei der Untersuchung an den Kiesbohrlöchern festgestellt werden konnte. Fällt der Grundwasserstand um 0,4 m, so erhöht sich die Infiltrationsmenge um etwa 10 %.

### 8.5.4 Beeinflussung der Infiltrationsleistung durch andere Organe

Die Infiltrationsmenge an anderen Organen wirkt sich in Form einer Grundwasserstandsänderung aus. Inwiefern sich die Infiltration an anderen Organen auf die Infiltrationsleistung am Sickerschlitgrab auswirkt, wird anschließend durch Simulationen untersucht. Dabei wird die Infiltrationsmenge der anderen Organe, die alle aus Kiesbohrlöchern bestehen, sukzessive von 0 m<sup>3</sup>/h auf 25 m<sup>3</sup>/h pro Bohrloch erhöht. Eine ausführliche Dokumentation der Simulationsergebnisse ist in Tabelle H-13 in Anlage H gegeben. In Abbildung 8-18 auf der folgenden Seite sind die Ergebnisse als Diagramm dargestellt.



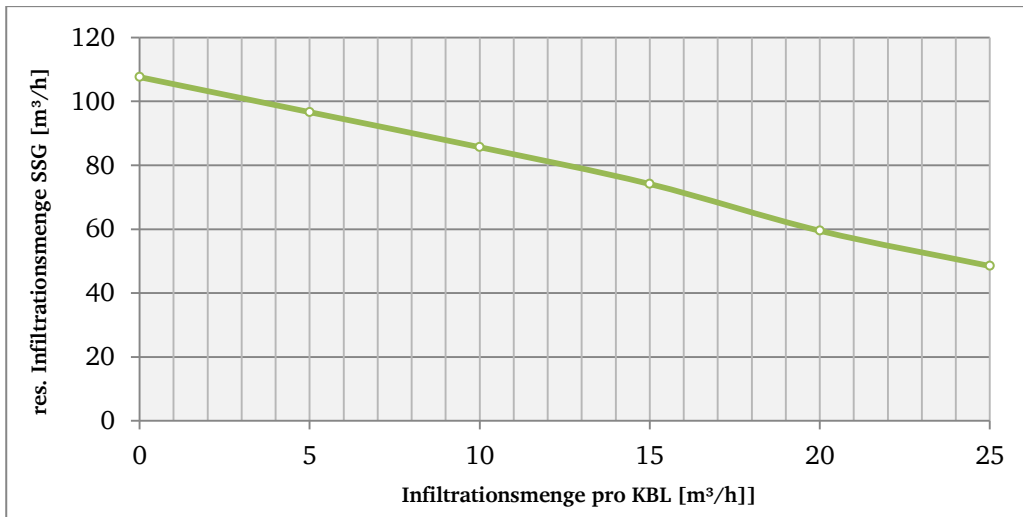


Abbildung 8-18: Einfluss der Infiltration an den anderen Organen auf die Infiltrationsmenge des Sickerschlitgrabens

Wie bereits bei der Untersuchung des Grundwasserstands, zeigt sich hier ein linearer Zusammenhang zwischen der Infiltrationsmenge an den anderen Organen und der Infiltrationsmenge am Sickerschlitgrabens. Bei einer Steigerung der Infiltrationsmenge von 10 m³/h auf 15 m³/h pro Bohrloch reduziert sich die Infiltrationsmenge am Sickerschlitgrabens um etwa 13 %.

---

## 9 Monitoringkonzept

---

Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse, die auf verschiedenen Simulationen mit den beiden erstellten Finite-Element-Modellen basieren, wird ein Monitoringkonzept zum Nachweis der Alterung entwickelt. Aus den vorherigen Kapiteln wird ersichtlich, dass verschiedene Parameter zu einer Alterung führen können. Andere Parameter jedoch, die einen Einfluss auf die Infiltrationsleistung haben, wie der Grundwasserstand und die Temperatur des Infiltrationswassers, sind unabhängig von stattfindenden Alterungsprozessen. Werden diese Parameter nicht beachtet, kann es zu einer Fehleinschätzung der durch eine Alterung hervorgerufenen Leistungsminderung kommen. Daher müssen bei einer Einschätzung einer möglichen Leistungsminderung durch eine Kolmation die Randbedingungen Grundwasserstand und Temperatur des Infiltrationswassers mit in die Bewertung integriert werden. Dies kann sich positiv auf die Betriebskosten auswirken, da somit die Durchführung einer nicht notwendigen Ertüchtigung eines Organs vermieden werden kann.

Um die Auswirkungen der Randbedingungen einschätzen zu können, muss deren Verlauf ausreichend dokumentiert werden. In Kapitel 7.5 wird deutlich, dass die Temperatur des Infiltrationswassers einen großen Einfluss auf die Infiltrationsleistung hat. Um diese Leistungsminderung nicht fälschlicherweise auf eine Alterung zurückzuführen, sollte die Temperatur des Infiltrationswassers aufgezeichnet werden, um Rückschlüsse auf deren Einfluss zum betrachteten Zeitpunkt ziehen zu können.

Zusätzlich zur Überstauhöhe im Kiesbohrloch bestimmt der Grundwasserstand den hydraulischen Gradienten, der wiederum Einfluss auf die Infiltrationsleistung hat. Der Grundwasserstand schwankt im Untersuchungsgebiet natürlich und anthropogen bedingt. Im Hinblick auf eine mögliche Alterung des Infiltrationsorgans müssen diese Grundwasserschwankungen berücksichtigt werden. Diese Schwankungen können sowohl großräumig als auch im näheren Umfeld des Organs in Folge einer gesteigerten Grundwasserförderung der Entnahmeburgen oder durch eine gesteigerte Infiltration auftreten. Die Entwicklung der Grundwasserstände wird an verschiedenen Messstellen im Untersuchungsgebiet bereits beobachtet. Bei der Bewertung einer möglichen Alterung sollten diese Daten daher zu den entsprechenden Zeitpunkten ausgewertet und der Einfluss des Grundwasserstands auf die Infiltrationsleistung abgeschätzt werden.

Um eine mögliche Kolmation der Filterschicht beurteilen und einschätzen zu können, sollten, zusätzlich zu den Randbedingungen Temperatur des Infiltrationswassers und Grundwasserstand Daten über die Infiltrationsmenge und die Überstauhöhe vorliegen. Hilfreich wäre hierbei die Erstellung einer Referenzdatenreihe, bei der Daten aller relevanten Parameter für verschiedene Zeitpunkte ohne Kolmation vorliegen. Mit diesen Referenzdaten können die bestehenden Verhältnisse eines Kiesbohrlochs verglichen und bewertet werden. Resultiert unter Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur des Wassers und des Grundwasserstands eine deutlich geringere Infiltrationsleistung bei gleicher Überstauhöhe als bei dem Referenzzustand, so kann von einer Kolmation in der Filterschicht ausgegangen werden.

Die Messung der Druckverhältnisse im Inneren des Kiesbohrlochs ist nicht zwingend notwendig, jedoch empfehlenswert. Wie bereits mehrfach erwähnt, wird bei entkoppelten Fließverhältnissen die Infiltrationsmenge ausschließlich durch die Durchströmung der Filtersandschicht bestimmt. Daher gilt es, eine Ablösung der Strömung zu vermeiden. Während des Betriebs kann dies durch die Überprüfung der Druckverhältnisse im Inneren erfolgen. Möglich ist jedoch auch hier die Erzeugung eines Referenzzustands. Dabei werden an einem Kiesbohrloch alle relevanten Parameter inklusive der Druckverhältnisse im Inneren von der Wiederinbetriebnahme nach einer Regeneration bis hin zur Ablösung der Strömung aufgenommen. Aufbauend auf diesen Daten kann anschließend in Abhängigkeit zu den Randbedingungen eine Kombination aus Infiltrationsmenge und Überstauhöhe festgelegt werden, ab deren Erreichen eine Regeneration durchgeführt werden soll, um ein Ablösen der Strömung zu vermeiden.

---

## 10 Konstruktive Veränderungen an den Kiesbohrlöchern

---

Eine Kolmation an den Infiltrationsorganen ist auf lange Sicht nicht vermeidbar, jedoch kann diese durch gezielte Maßnahmen zeitlich verzögert werden. In diesem Kapitel werden verschiedene konstruktive Empfehlungen für die Kiesbohrlöcher erläutert. Diese beziehen sich dabei unter anderem auf Vorschläge zur Vermeidung einer frühzeitigen Kolmation auf Grundlage der am Sickerschlitze beobachteten maßgebenden Fließgeschwindigkeiten sowie auf eine Verbesserung der Durchführung der Ertüchtigung, um die Betriebskosten und den Regenerierungsaufwand zu verringern. Je nach Art der Empfehlung sind diese vergleichsweise einfach durch einen geringen Aufwand umzusetzen oder erfordern einen größeren konstruktiven Eingriff.

### 10.1 Entfernung der Filtersandschicht

Durch die geringere Korngröße der Filtersandschicht im Vergleich mit der Filterkiesschicht resultieren hier größere Fließgeschwindigkeiten, die aufgrund der hierdurch bedingten Fracht eine Kolmation begünstigen. Durch die Entfernung der Filtersandschicht wird sich die Filtergeschwindigkeit nicht ändern, aber die Abstandsgeschwindigkeit kann hierdurch verringert werden. Die Sandschicht kann dabei durch Kies mit der gleichen Körnung wie die restliche Verfüllung ersetzt werden bzw. auch durch einen Kies mit größerer Körnung, z. B. mit einer Körnung von 3,15 - 5,6 mm.

Die in Kapitel 7.5.1 dokumentierte Simulation einer Infiltration ohne Filtersandschicht zeigt, dass hierdurch die Infiltrationsleistung an den Bohrlöchern A und B um etwa 45 % und an den anderen um etwa 25 % erhöht werden kann. Bei der Simulation wurde die Filtersandschicht durch Filterkies mit der gleichen Körnung wie bereits im Kiesbohrloch vorhanden mit einer Körnung von 2,0 – 3,15 mm ersetzt. Der nach der Gleichung von Hazen angesetzte Durchlässigkeitsbeiwert von  $4,6 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$  entspricht dem minimal zu erwartenden Wert. Beim Betrieb sowie beim Einbau von größerem Kies mit einer Körnung von 3,15 - 5,6 mm kann somit eine höhere Infiltrationsleistung erwartet werden.

Während des Betriebs zeigte sich, dass die Kolmation maßgeblich im oberen Bereich der Filtersandschicht auftritt. Es stellt sich daher die Frage, ob durch die Entfernung dieser Schicht eine Verschleppung der Kolmation bedingt wird und diese nun im Filterkies des Bohrlochs oder auch am Übergang zum Anstehenden auftritt. Um dies zu klären sollte zunächst lediglich an einem Kiesbohrloch die Entfernung der Filtersandschicht versuchsweise durchgeführt werden. Mittels Kernbohrungen im Kiesbohrloch sowie von außerhalb in den Übergangsbereich und in das Kiesbohrloch hinein sollte zudem eine mögliche Kolmation an diesen Stellen überprüft werden.

### 10.2 Einbau eines Geotextils

Unter Geotextilien werden Vliesstoffe, Gewebe und Maschenware zusammengefasst, die bei Baumaßnahmen in der Umwelt eingesetzt werden. Diese bestehen aus synthetischen Stoffen wie bspw. Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) oder Polyamid (PA). Vliesstoffe setzen sich aus flächig aufeinanderliegenden und thermisch oder mechanisch verfestigten kurzen Spinnfasern oder Endlosfäden zusammen (PRINZ & STRAUSS, 2018, S. 420)

Zu Beginn des Infiltrationsbetriebs an den Kiesbohrlöchern waren Vliese zur Trennung zwischen den verschiedenen Filterschichten eingebaut. Aufgrund der bereits beschriebenen Förderung einer Kolmation durch diese Vliese wurden sie ausgebaut und nicht weiter verwendet. Der erneute Einsatz eines anderen Vlieses, ohne Freisetzung organischer Stoffe, kann jedoch den Regenerierungsaufwand verringern. Dieses Vlies kann als Ersatz der Filtersandschicht eingebaut und bei zu starker Leistungsminderung der Infiltration durch Kolmation vergleichsweise einfach ausgetauscht werden. Die Verwendung eines Geotextils anstelle der Filtersandschicht sollte zunächst an einem Kiesbohrloch über einen längeren Zeitraum getestet werden, um mögliche positive sowie negative Auswirkungen abschätzen zu können.

---

Bei einer erneuten Verwendung eines Geotextils sollte dabei darauf geachtet werden, dass dieses Textil eine Kolmation nicht begünstigt. Am Fachgebiet Wasserreinhaltung der Technischen Universität Berlin wurden verschiedene Geotextilien hinsichtlich der Freisetzung organischer Stoffe untersucht. Im Hinblick auf eine möglichst geringe Freisetzung dieser Stoffe haben Komposittextilien die besten Ergebnisse erzielt. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus gewebtem und gefilztem Stoff.

### 10.3 Erhöhung des hydraulischen Gradienten

In Kapitel 7.5.4 wurde der hydraulische Gradient hinsichtlich seiner Bedeutung für die Infiltrationsleistung untersucht. Da auf den Grundwasserstand kein Einfluss genommen werden kann bzw. die Infiltration eine Erhöhung des Grundwasserstands im Umfeld des Organs bedingt, kann der hydraulische Gradient vor Ort nur mittels einer Vergrößerung der Überstauhöhe erreicht werden. Bei den Randbedingungen der Simulation führte eine Erhöhung des Überstaus um 0,5 m zu einer um etwa 20 % größeren Infiltrationsmenge.

Durch einen konstruktiven Umbau des Infiltrationsorgans, in Form einer Erhöhung des Schachtrings, kann eine größere Überstauhöhe erreicht und dadurch der hydraulische Gradient erhöht werden. Dadurch könnte in den Wintermonaten den negativen Auswirkungen der Temperatur des Infiltrationswassers auf die Infiltrationsleistung entgegengewirkt werden. Hierbei ist zu überprüfen, ob diese Maßnahme vor Ort durchführbar. Zur Beurteilung sollte die Maßnahme ggf. an einem Kiesbohrloch probeweise durchgeführt werden, um die Auswirkungen einer solchen konstruktiven Änderung auf die Infiltrationsleistung in der Praxis bewerten zu können.

### 10.4 Ausbau zu einem Schluckbrunnen

Eine weitere konstruktive Möglichkeit ist der Ausbau des Kiesbohrlochs zu einem Schluckbrunnen. Der Vorteil einer solchen konstruktiven Veränderung besteht unter anderem in der dadurch möglichen Regenerierung durch Strömungsumkehr, womit einer Alterung entgegen gewirkt werden kann. Für einen Ausbau zu einem Schluckbrunnen wird die bereits vorhandene Bohrung um 10 m mit kleinem Bohrdurchmesser verlängert. Bei einem Aufstau im Schluckbrunnen ergibt sich eine quasi hydrostatische Druckverteilung, sodass eine gleichmäßige Strömung aus dem Filterrohr in den umgebenden Ringraum erfolgt. Für die Beurteilung einer möglichen Kolmationsgefährdung sind drei Geschwindigkeiten maßgeblich: die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Filterrohr in den Ringraum, die Fließgeschwindigkeit im Ringraum und die Fließgeschwindigkeit beim Übergang in das Anstehende. Die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Filterrohr wird bestimmt durch die zur Verfügung stehende Austrittsfläche des verwendeten Filterrohres. Das beste Verhältnis von Filterrohrdurchmesser, Schlitzweite und Austrittsfläche bietet ein Wickeldrahtfilter.

Bei einer vorhandenen Bohrtiefe von 9 m und der Verlängerung dieser um 10 m ergibt sich eine Endteufe von 19 m, wodurch eine Filterstrecke  $l_F$  von 14 m umgesetzt werden kann. Bei der Verwendung eines Wickeldrahtfilters mit DIN 400, einer Schlitzweite von 1 mm und einer Austrittsfläche  $A_A$  von  $0,28 \text{ m}^2$  pro laufenden Meter (Profil 350) resultiert eine Austrittsfläche  $A_1$  von  $3,9 \text{ m}^2$ . Im Inneren des Filterrohres entspricht die Filtergeschwindigkeit der Abstandsgeschwindigkeit. Mit der aus dem Sickerschlitze resultierenden Abstandsgeschwindigkeit von  $13 \text{ m/h}$  als Kriterium für eine maximal zulässige Geschwindigkeit ergibt sich eine maximale Infiltrationsleistung  $Q_{\max,1}$  von etwa  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ .

$$A_1 = l_F \cdot A_A = 14 \text{ m} \cdot 0,28 \text{ m}^2/\text{m} = 3,9 \text{ m}^2 \quad (10.1)$$

$$Q_{\max,1} = v_{a,\max} \cdot A_1 = 13 \text{ m/h} \cdot 3,9 \text{ m}^2 = 50,7 \text{ m}^3/\text{h} \quad (10.2)$$

$$A_2 = 2\pi r \cdot l_F = 2\pi \cdot 0,2 \text{ m} \cdot 14 \text{ m} = 17,6 \text{ m}^2 \quad (10.3)$$

$$Q_{\max,2} = v_{f,\max} \cdot A_2 = 2,6 \text{ m/h} \cdot 17,6 \text{ m}^2 = 45,8 \text{ m}^3/\text{h} \quad (10.4)$$

$$v_{2,a} = \frac{v_{f,\max}}{n_{\text{eff}}} = \frac{2,7 \text{ m/h}}{0,3} = 8,7 \text{ m/h} < 13 \text{ m/h} \quad (10.5)$$

Mit einer maximal zulässigen Filtergeschwindigkeit 2,6 m/h ergibt sich unmittelbar um das Filterrohr herum eine maximale Infiltrationsmenge  $Q_{\max,2}$  von 45,8 m<sup>3</sup>/h. Mit einer effektiven Porosität von 0,3 für den Filterkies wird das Kriterium für die Abstandsgeschwindigkeit eingehalten.

$$A_3 = 2\pi r \cdot l_F = 2\pi \cdot 0,40 \text{ m} \cdot 14 \text{ m} = 35,2 \text{ m}^2 \quad (10.6)$$

$$Q_{\max,3} = v_{\max} \cdot A_3 = 2,6 \text{ m/h} \cdot 35,2 \text{ m}^2 = 91,5 \text{ m}^3/\text{h} \quad (10.7)$$

$$v_{3,a} = \frac{v_{f,\max}}{n_{\text{eff}}} = \frac{2,6 \text{ m/s}}{0,3} = 8,7 \text{ m/s} < 13 \text{ m/h} \quad (10.8)$$

Bei einer Verlängerung der Bohrung mit einem Bohrdurchmesser von 800 mm ergibt sich eine maximale Infiltrationsmenge  $Q_{\max,3}$  von 91,5 m<sup>3</sup>/h, mit der die maximale Abstandsgeschwindigkeit von 9 m/h am Übergang zum Anstehenden eingehalten wird. Die maximale Infiltrationsleistung  $Q_{\max,1}$  am Filterrohr ist als kleinste Menge mit etwa 45 m<sup>3</sup>/h maßgebend. Mit dem Umbau der fünf bzw. sieben Kiesbohrlöcher pro Organ und demnach einer Infiltrationsleistung von 225 m<sup>3</sup>/h bzw. 315 m<sup>3</sup>/h wird eine gewünschte Infiltrationsmenge von 150 m<sup>3</sup>/h überschritten. Es wäre daher ausreichend, vier Kiesbohrlöcher pro Organ dementsprechend auszubauen. Zur Überprüfung des Betriebs sowie zur Einschätzung der in der Praxis resultierenden Infiltrationsleistung sollte zunächst nur ein Kiesbohrloch zu einem Schluckbrunnen umfunktioniert werden. Anschließend kann dieser Umbau ggf. an weiteren Kiesbohrlöchern erfolgen.

## 10.5 Einbau von Filterrohren

Durch den Einbau von Filterrohren in das Kiesbohrloch wird die Beschickung, die zurzeit ausschließlich von oben stattfindet, verändert, sodass diese gleichmäßig über die Tiefe erfolgt. Bei einem Einbau von vier Filterrohren mit DIN 150 und Wickeldrahtfilter, der eine Schlitzweite von 1 mm und eine Austrittsfläche von 0,15 m<sup>2</sup> pro laufenden Meter (Profil 250) aufweist, ergibt sich bei einer Filterstrecke  $l_F$  von 7 m eine Gesamtaustrittsfläche  $A_1$  von 4,2 m<sup>2</sup>. Bei einer Infiltrationsmenge  $Q$  von 30 m<sup>3</sup>/h pro Kiesbohrloch führt das zu einer Austrittsgeschwindigkeit  $v_1$  von 7,1 m/s.

$$A_1 = l_F \cdot A_A = 7 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m}^2/\text{m} \cdot 4 = 4,2 \text{ m}^2 \quad (10.9)$$

$$v_{1,a} = \frac{Q}{A_1} = \frac{30 \text{ m}^3/\text{h}}{4,2 \text{ m}^2} = 7,1 \text{ m/h} < 13 \text{ m/h} \quad (10.10)$$



$$A_2 = 2\pi r \cdot l_F \cdot 4 = 2\pi \cdot 0,075 \text{ m} \cdot 7 \text{ m} \cdot 4 = 13,2 \text{ m}^2 \quad (10.11)$$

$$v_{2,f} = \frac{Q}{A_2} = \frac{30 \text{ m}^3/\text{h}}{13,2 \text{ m}^2} = 2,3 \text{ m/h} < 2,6 \text{ m/h} \quad (10.12)$$

$$v_{2,a} = \frac{v_{2,f}}{n_{\text{eff}}} = \frac{2,3 \text{ m/h}}{0,3} = 7,7 \text{ m/h} < 13 \text{ m/h} \quad (10.13)$$

Unmittelbar um die Filterrohre herum in der Kiesfüllung resultiert eine Filtergeschwindigkeit  $v_{2,f}$  von 2,3 m/h und mit einem effektivem Porenanteil von 0,3 für Kies eine Abstandsgeschwindigkeit  $v_{2,a}$  von 7,7 m/h. Die resultierenden Geschwindigkeiten liegen unter den Kriteriumswerten von 2,6 m/h für die Filtergeschwindigkeit und 13 m/h für die Abstandsgeschwindigkeit, sodass diese den Anforderungen an die maximal zulässige Geschwindigkeit entsprechen.

Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts ist eine zusätzliche Regenerierungsmöglichkeit. Während über drei Filterrohre Wasser in das Kiesbohrloch geleitet wird, kann über das vierte Rohr Wasser abgepumpt werden. Dadurch entsteht gebietsweise eine Umkehrströmung im Inneren des Bohrlochs, die einer Alterung entgegen wirken kann. Durch die Möglichkeit eines Abpumpens kann ggf. auch eine chemische Regenerierung durchgeführt werden. Um die Auswirkungen eines solchen konstruktiven Umbaus beurteilen zu können, sollte zunächst nur ein Kiesbohrloch entsprechend ausgestattet werden und während des Betriebs die erforderlichen Daten für eine Auswertung, wie bspw. Infiltrationsmenge, Überstauhöhe und Druckverhältnisse im Inneren, aufgenommen werden.

---

## 11 Fazit und Ausblick

---

In Kooperation mit der Hessenwasser GmbH & Co. KG und der Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH (BGS UMWELT) wurden mit dieser Arbeit Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen im Hessischen Ried untersucht. Aufbauend auf bestehenden Infiltrationsorganen wurden hierzu zwei Finite-Element-Modelle erstellt. Mit diesen Modellen, eins für ein Infiltrationsorgan bestehend aus Kiesbohrlöchern und eins für einen Sickerschlitgrab, wurden die grundwasserhydraulischen Parameter, die Einfluss auf die Infiltrationsleistung haben, identifiziert und quantifiziert. Bei der Verwendung des erstellten Modells des Sickerschlitgrabens für eine Wärmetransportrechnung zeigte sich, dass der Arbeitsspeicher des verwendeten Computers für diese Berechnung nicht ausreichend war. Auch eine Vergrößerung des Finite-Element-Netzes konnte das Problem nicht beheben, sodass bei diesem Modell die Simulationen ausschließlich mit einer einfachen stationären Strömungsmodellierung erfolgten. Auf Grundlage der aus den Simulationen gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Monitoringkonzept zum Nachweis der Alterung an den Kiesbohrlöchern erarbeitet. Für eine Verbesserung und Optimierung des Infiltrationsbetriebs wurden anhand der Simulationsergebnisse Vorschläge für konstruktive Veränderungen an den Kiesbohrlöchern ausgearbeitet.

Die Untersuchung der auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden grundwasserhydraulischen Parameter zeigt, dass, neben augenscheinlichen Faktoren, wie dem Grundwasserstand, die Temperatur des Infiltrationswassers große Auswirkungen auf die Infiltration hat. Hierfür wurde eine Wärmetransportrechnung durchgeführt, bei der die Temperatur des Infiltrationswassers und die des Grundwassers bei der Strömungsmodellierung berücksichtigt werden. Dies ist bei einer einfachen Strömungsmodellierung nicht der Fall. Bei dieser Untersuchung ergab sich, dass alleine aufgrund des Temperaturunterschiedes im Winter eine um 35 % geringere Infiltrationsmenge als im Sommer resultiert. Wird dieser Einfluss der Temperatur nicht berücksichtigt oder unterschätzt, kann dies fälschlicherweise als Alterung des Infiltrationsorgans interpretiert werden.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen des hydraulischen Gradienten auf die Infiltrationsleistung zeigte sich, dass die durch die Temperatur verringerte Infiltrationsleistung teilweise durch einen größeren hydraulischen Gradienten an den Kiesbohrlöchern kompensiert werden kann. Um dies zu erreichen, kann der Überstau erhöht werden. Hierfür ist es ggf. notwendig die Höhe des Schachtrings bei den Kiesbohrlöchern zu vergrößern.

Aufgrund der größeren Infiltrationsoberfläche an einem Sickerschlitgrab kann sich der Temperatureinfluss hier geringer auswirken. Da dies wegen der bereits beschriebenen Problematik bei der Simulation mit dem Modell für den Sickerschlitgrab nicht explizit überprüft werden konnte, sollte dies ggf. nachgeholt werden. Hierdurch wäre eine Einschätzung der Auswirkungen der Temperatur speziell an einem Sickerschlitgrab möglich.

Aufgrund der unterschiedlichen Bauweise resultieren bei der Infiltration an Kiesbohrlöchern deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten als bei einem Sickerschlitgrab. Trotz der vergleichsweise geringen Eisenkonzentrationen von etwa 0,007 mg/l resultiert daher eine scheinbar ausreichende Fracht für die Ansiedlung von Mikroorganismen, die das Eisen für ihren Stoffwechsel verwerten. Die hieraus induzierte Kolmation kann zu einer Verminderung der Infiltrationsleistung an den Organen führen. Um eine durch die Fließgeschwindigkeit bedingte Kolmation zu verhindern, kann die Filtersandschicht entfernt werden. Die Auswirkungen einer solchen Maßnahme sollte jedoch zunächst an einem Kiesbohrloch überprüft werden, da aufgrund der fehlenden Schicht die Kolmation in tiefere Bereiche des Bohrlochs verschleppt werden kann. Eine andere Möglichkeit der Verringerung der Fließgeschwindigkeiten stellen geeignete konstruktive Verbesserungen dar. Hierzu zählt eine Veränderung der Beschickung der Kiesbohrlöcher in Form eines Umbaus zu Schluckbrunnen oder eines Einbaus von Filterrohren.

---

Um eine Alterung des Infiltrationsorgans durch Kolmation richtig einschätzen zu können, müssen alle auf die Infiltrationsleistung einflussnehmenden Parameter berücksichtigt werden. Von Vorteil kann hier die Schaffung einer Referenzdatenreihe sein, mit der der aktuelle Zustand verglichen und abgeschätzt werden kann. Da ein Abreißen der Strömung vergleichsweise zu einer sehr starken Verringerung der Infiltrationsleistung führt, ist dies im Betrieb zu vermeiden. Durch die Festlegung eines aus der Praxis resultierenden Parameterdatensatzes kann der Zeitpunkt für eine notwendige Ertüchtigungsmaßnahme festgelegt werden.

Die notwendigen Ertüchtigungsmaßnahmen aufgrund der Kolmation an den Kiesbohrlöchern führen zu erhöhten Betriebskosten. Durch den Einsatz eines Geotextils oberhalb der Filtersandschicht oder als Ersatz dieser kann die Regenerierung verbessert werden. Der vereinfachte Ein- und Ausbau eines solchen Textils im Vergleich mit dem Austausch der Filtersandschicht würde die Betriebskosten verringern. Jedoch muss aufgrund der bereits bekannten Problematik darauf geachtet werden, dass das Textil keine oder nur sehr geringe Anteile an Tensiden enthält, die eine Kolmation des Textils begünstigen würden.

Um den Prozess der Kolmation an den Kiesbohrlöchern weitergehend zu untersuchen, wäre die Verwendung eines instationären Modells möglich. Mit einer planmäßigen Datenaufnahme an einem Kiesbohrloch ab dem Zeitpunkt einer durchgeführten Ertüchtigungsmaßnahme bis hin zur Durchführung der nächsten notwendigen Maßnahme, könnte gezielt ein Modell aufgebaut werden, mit dem die Veränderung der Durchlässigkeit durch eine Kolmation untersucht werden kann. Hierbei sollten die Parameterwerte Infiltrationsmenge, Überstauhöhe, Grundwasserstand und Druckverhältnisse, in allen drei Rammfilterlanzen, aufgezeichnet werden. Auf Grundlage dieser Daten könnte der nach der Regenerierung vorhandene Durchlässigkeitsbeiwert modelliert werden sowie dessen sukzessive Verringerung durch eine Kolmation.

---

## Literaturverzeichnis

---

**Beregnungswasserverband Hessisches Ried (2015):** *Satzung „Beregnungswasserverband Hessisches Ried (WHR-Beregnung)“ in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Februar 2015.* Staatsanzeiger für das Land Hessen, 2015, Nr. 9, ISSN 0724-7885,  
URL: [http://www.wasserverband-hessisches-ried.de/download/Satzung\\_WHR-Beregnung\\_23.02.2015.pdf](http://www.wasserverband-hessisches-ried.de/download/Satzung_WHR-Beregnung_23.02.2015.pdf) [Stand: 21.02.2018]

**BGS UMWELT (2008a):** *Wasserrechtsverfahren Infiltration Jägersburger Wald. Teil I: Wasserwirtschaftliche Unterlagen.* Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH, Darmstadt, Dezember 2008, nicht veröffentlichtes Dokument

**BGS UMWELT (2008b):** *Wasserwirtschaftliche Prüfung der Realisierbarkeit des Wiederaufspiegelungskonzeptes von Hessen-Forst für die Wälder im südlichen und mittleren Hessischen Ried. Modul 1.* Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH, Projekt 4680 – 07, Darmstadt, Juni 2008, nicht veröffentlichtes Dokument

**BGS UMWELT (2013):** *Ertüchtigung des Infiltrationsorgans 6 der Infiltrationsanlage Jägersburger Wald.* Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH, Projekt 5107 – 11, Darmstadt, März 2013, nicht veröffentlichtes Dokument

**BGS UMWELT (2016):** *Infiltration Eschollbrücken/Pfungstadt – Unterlagen zum Wasserrechtsantrag (mit integrierter Umweltverträglichkeitsstudie).* Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH, Projekt 5327 –13, Darmstadt, Januar 2016, nicht veröffentlichtes Dokument

**Bundesministerium des Inneren (Hg.) (1985):** *Künstliche Grundwasseranreicherung, Stand der Technik und des Wissens in der Bundesrepublik Deutschland.* Erich Schmidt Verlag. Berlin

**Darcy, H. (1856):** *Les fontaines publiques de la ville Dijon.* 16. Paris (Dalmont)

**DIN 4046 (1983):** *Wasserversorgung. Begriffe. Technische Regel des DVGW.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V., September 1983

**DIN 4049-3 (1994):** *Hydrologie. Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 1994

**DIN 4108-4 (2017):** *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V., März 2017

**DIN 4900-2 (2017):** *Filter-und Vollwandrohre aus Stahl für Brunnen – Teil 2: Wickeldrahtfilterrohre aus nichtrostendem Stahl.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Oktober 2017

**DIN 18130-1 (1998):** *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts. Teil 1: Laborversuche.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 1998

**DIN EN ISO 8044:2015-12:** *Korrosion von Metallen und Legierungen - Grundbegriffe (ISO 8044:2015);* Dreisprachige Fassung EN ISO 8044:2015

**DIN EN ISO 10456 (2010):** *Baustoffe und Bauprodukte – Wärme und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte.* DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 2010

---

**DVGW Arbeitsblatt W 101 (2006):** *Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser.* Bonn. Juni 2006

**DVGW-Arbeitsblatt W126 (2007):** *Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung für die Trinkwassergewinnung.* Bonn. September 2007

**DVGW-Arbeitsblatt W130 (2017):** *Brunnenregenerierung.* Bonn. Oktober 2017

**DWA Arbeitsblatt DWA-A 138 (2005):** *Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser.* DWA-Regelwerk. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, April 2005

**DWA Merkblatt DWA-M 153 (2007):** *Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser.* DWA-Regelwerk. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, August 2007

**Fritsch et al. (2014):** *Mutschmann/Stimmelmayer. Taschenbuch der Wasserversorgung.* 16. Auflage, Springer-Vieweg-Verlag Wiesbaden

**Hagen, G. (1870):** *Über die Bewegung des Wassers in cylindrischen, nahe horizontalen Leitungen (mit einem Anhang: Über die Bewegung des Wassers in abwärts gerichteten Röhren).* Mathematische Abhandlungen der königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (1869). Berlin (Fred. Dümmler's Verl.-Buchh.).

**Hazen, A. (1892):** *Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration.* Ann. Rep. Mass. State Bd. Health. Boston.

**Hering et al. (2007):** *Physik für Ingenieure.* 10. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

**Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (o. J.):** „Grundwasserkarten“. In: <https://www.hlnug.de/themen/wasser/grundwasser/grundwasserkarten.html> (18.07.2018)

**Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (Hg.) (2005):** *Das Hessische Ried - zwischen Vernässung und Trockenheit.* Wiesbaden, August 2005

**Hölting, B.; Coldewey, W. G. (2013):** *Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.* 8. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

**Holzbecher, E. (1996):** *Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie. Grundwasser und ungesättigte Zone. Eine Einführung.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg

**Houben, G.; Treskatis, Ch. (2003):** *Regenerierung und Sanierung von Brunnen.* Oldenburg Industrieverlag München

**HWG (2010):** *Hessisches Wassergesetz (HWG).* Vom 14. Dezember 2010 und geändert durch Artikel 62 des Gesetzes vom 13. Dezember 2012 (GVBl. S. 622)

**Kinzelbach, W.; Rausch, R. (1995):** *Grundwassermodellierung. Eine Einführung mit Übungen.* Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart

**König et al. (2017):** *Spring – Simulation of Processes in Groundwater – Benutzerhandbuch – Die professionelle Software für die Gewässersystem-Modellierung.* delta h Ingenieurgesellschaft mbH. Witten, Oktober 2017



---

**Mikat, H., Weber, L. (2011a):** *Grundwasseranreicherungsanlagen im Hessischen Ried*. Fachmagazin für Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie, bbr Heft 01/2011, Januar 2011

**Mikat, H., Weber, L. (2011b):** *Grundwasseranreicherungsanlagen im Hessischen Ried – Leistungsvermögen und Rehabilitation*. Fachmagazin für Leitungsbau, Brunnenbau und Geothermie, bbr Heft 06/2011, Juni 2011

**Mull, R.; Holländer, H. (2002):** *Grundwasserhydraulik und –hydrologie. Eine Einführung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

**Prinz, H.; Strauß, R. (2018):** *Ingenieurgeologie*. 6. Auflage, Springer-Verlag Berlin

**Regierungspräsidium Darmstadt (Hg.)(1999):** *Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried*. Darmstadt, 9.April 1999.

**Trinkwasserverordnung (2001):** *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV)*. Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 3. Januar 2018 (BGBl. I S. 99) geändert worden ist

**Verein zur Förderung des Instituts WAR (1980):** *Brunnenalterung – Theorie und Praxis, Regenerierungsmöglichkeiten*. Schriftenreihe WAR 1. Wassertechnisches Seminar, TH Darmstadt, Darmstadt

**Verein zur Förderung des Instituts WAR (1997):** *Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen*. Schriftenreihe WAR 103. 53. Darmstädter Seminar Wasserversorgung in Darmstadt mit dem Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches, TU Darmstadt, Darmstadt

**Verein zur Förderung des Instituts WAR (Hg.) (2002):** *65. Darmstädter Seminar – Wasserversorgung. Grundwasserproblematik im Hessischen Ried: Eine unlösbare Aufgabe?*. Schriftenreihe WAR 146, Darmstadt

**Wasserverband Hessisches Ried (1989a):** *Infiltrationsanlage Allmendfeld. Antrag auf Erteilung einer gehobenen Erlaubnis zur Einleitung von aufbereitetem Rheinwasser in das Grundwasser nach §17 a HWG zur Anreicherung des Grundwassers im Bereich des Wasserwerks Allmendfeld*. Dipl. – Ing. Horst Unger vorm. Dr. Ing. Carl; Ing.-Büro Golüke GmbH; Bauberatung Henkel GmbH. Mühlthal, 9. Juni 1989; nicht veröffentlichtes Dokument

**Wasserverband Hessisches Ried (1989b):** *Infiltrationsanlage Jägersburger Wald. Antrag auf Erteilung einer gehobenen Erlaubnis zur Einleitung von aufbereitetem Rheinwasser in das Grundwasser nach §17 a HWG zur Anreicherung des Grundwassers im Bereich des Wasserwerks Jägersburg*. Dipl. – Ing. Horst Unger vorm. Dr. Ing. Carl; Ing.-Büro Golüke GmbH; Bauberatung Henkel GmbH. Mühlthal, 9. Juni 1989, nicht veröffentlichtes Dokument

**Wasserverband Hessisches Ried (2005):** *Erläuterungsbericht zum Wasserrechtsantrag Infiltrationsanlage Gernsheimer Wald des Wasserverbandes Hessisches Ried*. Hessenwasser GmbH & Co. KG, Groß-Gerau, Oktober 2005, nicht veröffentlichtes Dokument

**Wasserverband Hessisches Ried (2015):** *Satzung „Wasserverband Hessisches Ried (WHR)“ in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Februar 2015*. Staatsanzeiger für das Land Hessen, Nr. 9, ISSN 0724-7885,  
URL: [http://www.wasserverband-hessisches-ried.de/download/Satzung\\_WHR\\_23.02.2015.pdf](http://www.wasserverband-hessisches-ried.de/download/Satzung_WHR_23.02.2015.pdf)  
[Stand: 21.02.2018]

---

**Wasserverband Hessisches Ried (o. J.):** *Der Wasserverband Hessisches Ried.* URL: <http://www.wasserverband-hessisches-ried.de/html/vorstellung.html> [Stand: 19.02.2018]

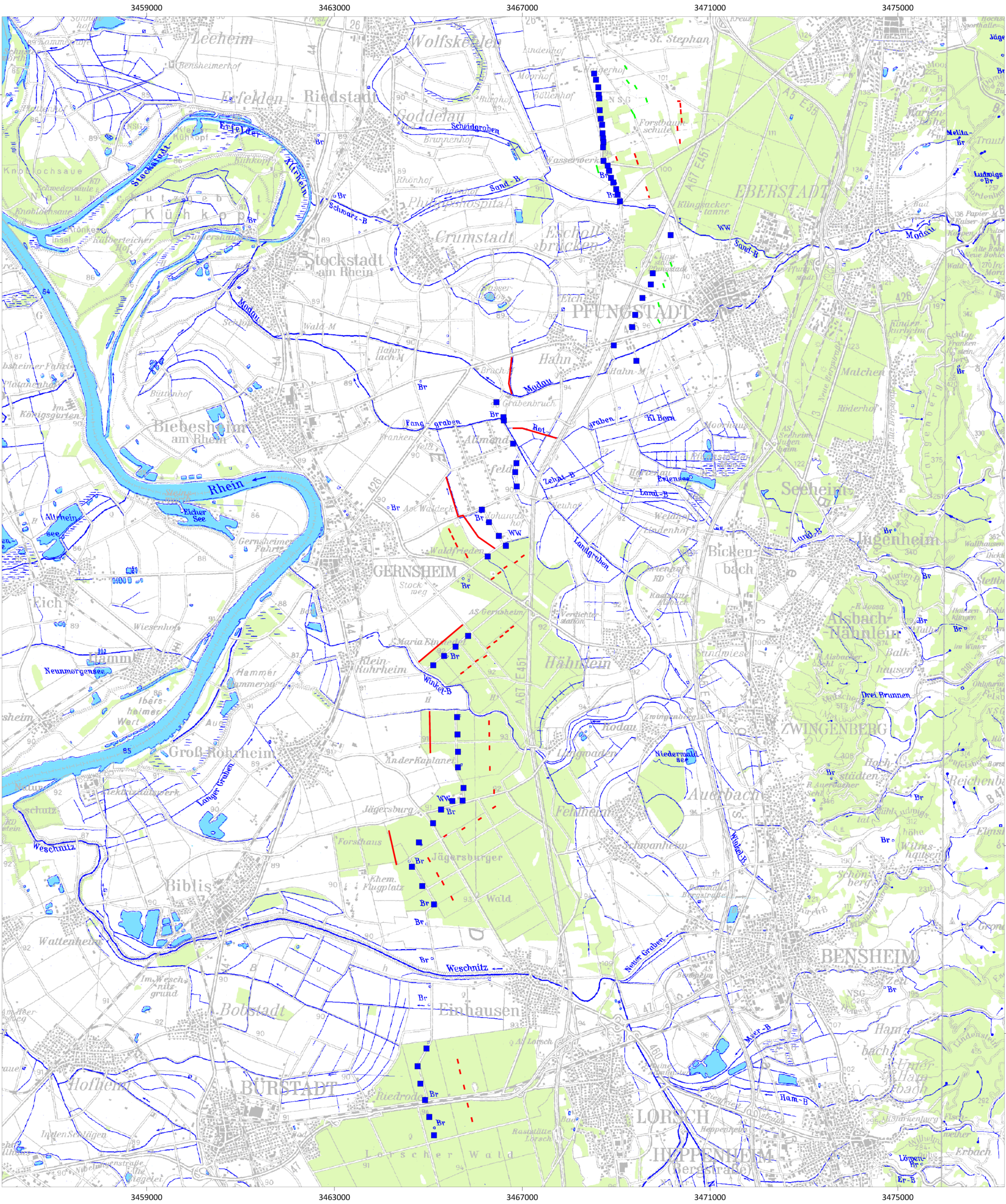
**WHG (2009):** *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG).* Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist



---

## Anlage



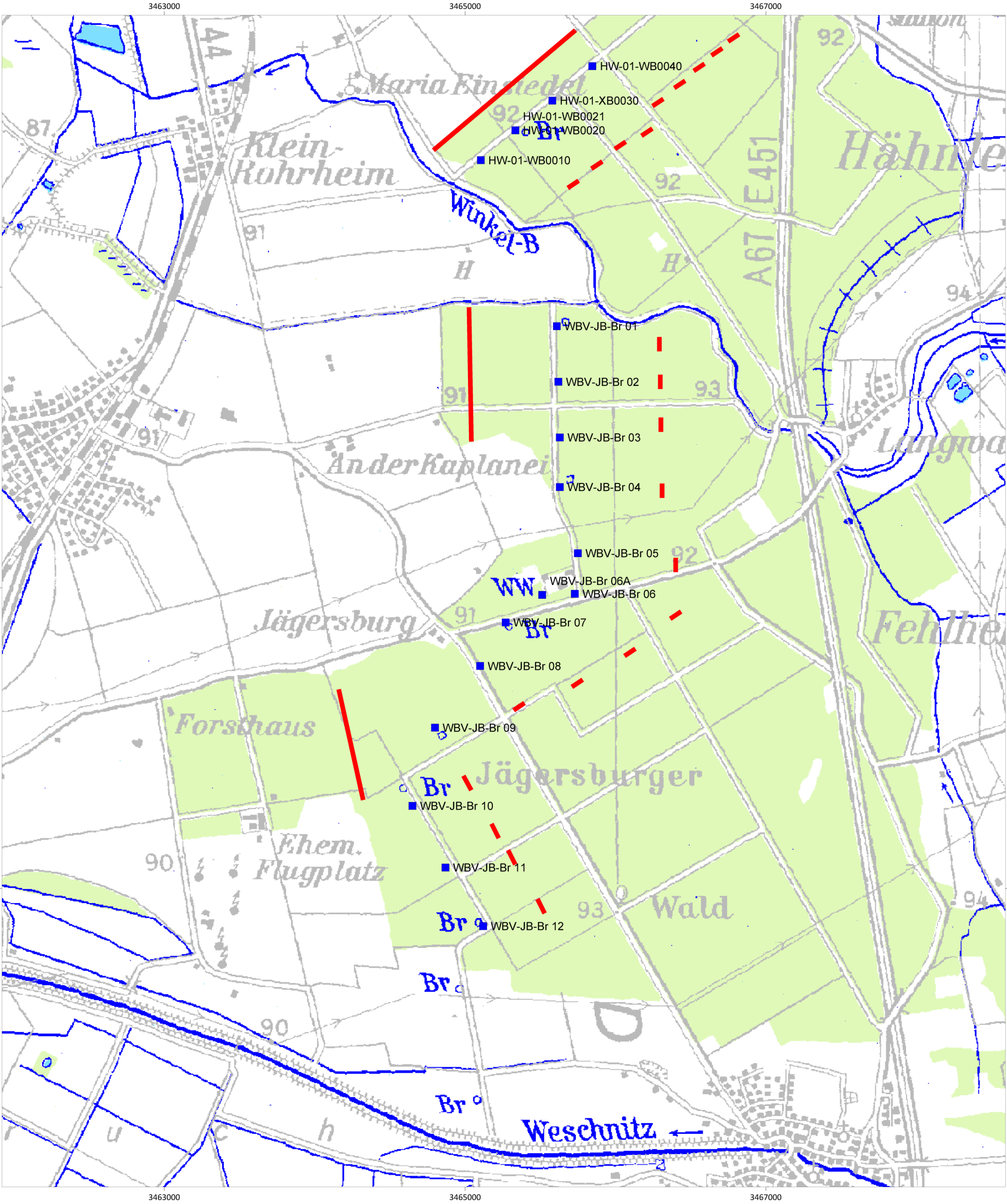


Legende:

- Brunnen
- Infiltrationsorgan, vorhanden
- Infiltrationsorgan, geplant

<div><div>BGS UMWELT</div><div>Tel (0 61 51) 94 56-0 • Fax (0 61 51) 94 56-80 www.bgs Umwelt.de • info@bgs Umwelt.de Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH An der Eschollmühle 28 • D-64297 Darmstadt</div></div>		Anlage: <div>A.1</div>
Projekt : Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen im Hessischen Ried		Maßstab: 1:80.000
Planbezeichnung: Übersichtslageplan		Datei: 5503-002.dwg Layout: Anlage-A.1 Bearb.: Erg.
Auftraggeber:	BGS UMWELT Darmstadt, den	Gez.: Kes.
		Datum: Sep. 2018 Projekt-nummer: 5503





Legende:

- Brunnen
- Infiltrationsorgan, vorhanden

**BGS UMWELT** Tel (0 61 51) 94 56-0 • Fax (0 61 51) 94 56-80  
www.bgs Umwelt.de • info@bgs Umwelt.de  
Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH An der Eschollmühle 28 • D-64297 Darmstadt

Anlage:  
**A.2**

Projekt :  
Alterungsprozesse an Infiltrationsanlagen im  
Hessischen Ried

Maßstab:  
1:25.000

Planbezeichnung:  
Übersichtslageplan  
Jägersburger Wald

Datei: 5503-003.dwg

Layout: Anlage-A.2

Bearb.: Erg.

Auftraggeber:  
BGS UMWELT  
Darmstadt, den

Gez.: Kes.

Datum: Sep. 2018

Projekt-  
nummer: 5503





## Anlage B: Infiltrationsmenge verschiedener Organe im Hessischen Ried

### Infiltrationsmenge am Organ 1 im Gernsheimer Wald

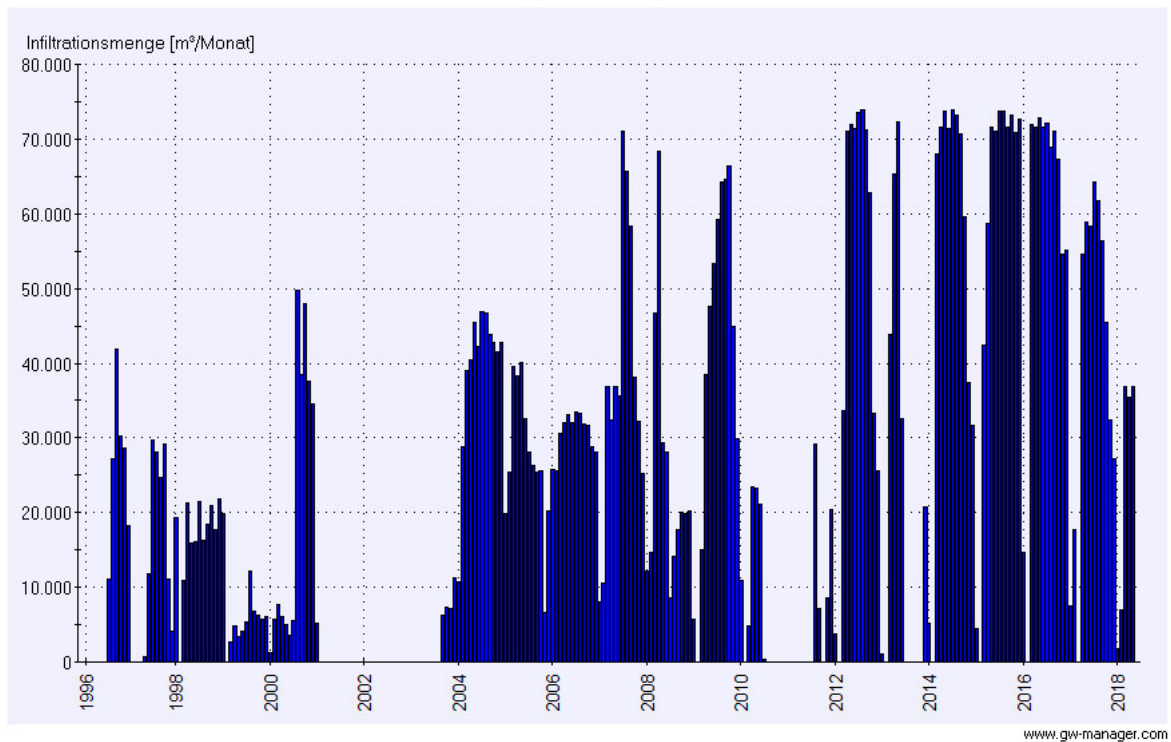


Abbildung B-1: Infiltrationsmenge am Organ 1 im Gernsheimer Wald von 1996 - 2018

### Infiltrationsmenge am Organ 3 im Gernsheimer Wald

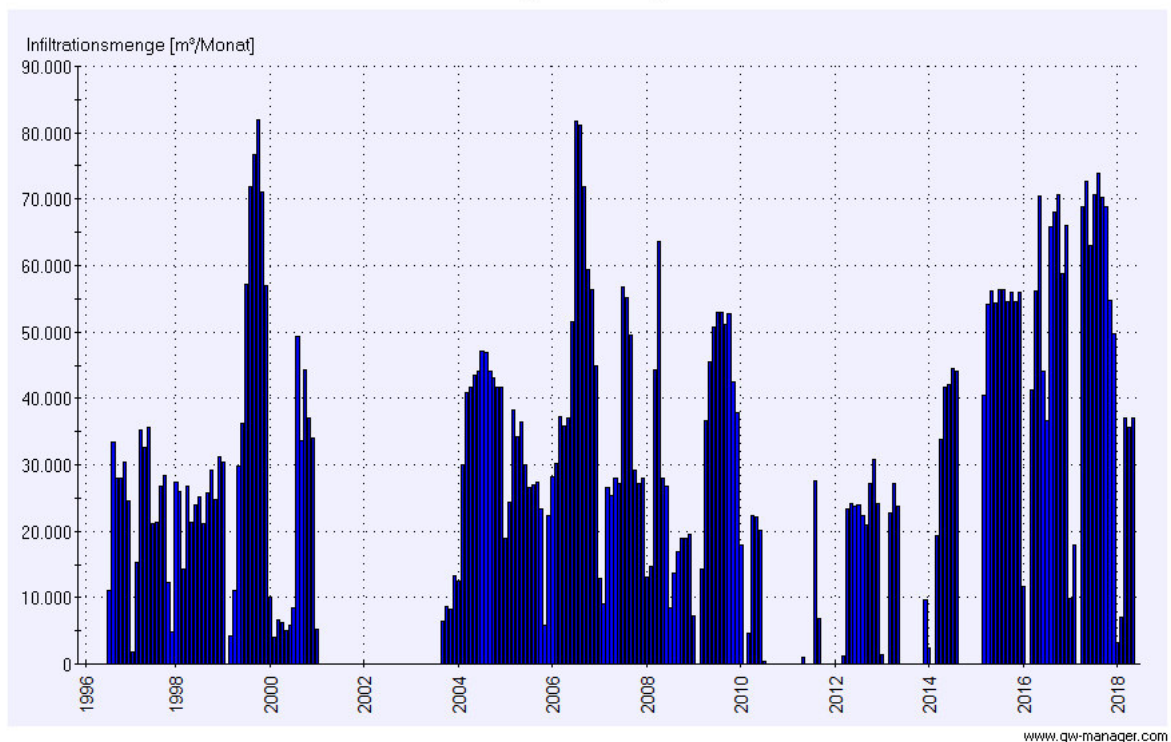


Abbildung B-2: Infiltrationsmenge am Organ 3 im Gernsheimer Wald von 1996 – 2018

### Infiltrationsmenge am Organ 4 im Gernsheimer Wald

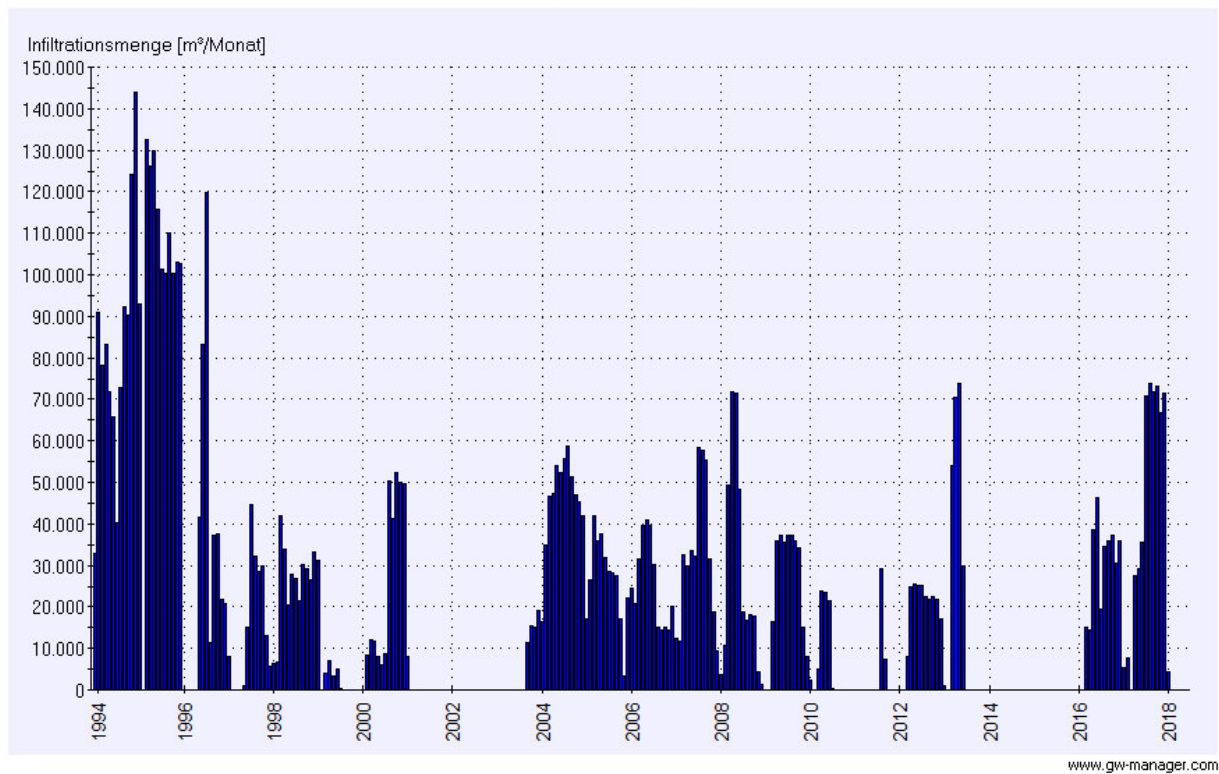


Abbildung B-3: Infiltrationsmenge am Organ 4 im Gernsheimer Wald von 1994 - 2018

### Infiltrationsmenge am Organ 5 im Gernsheimer Wald

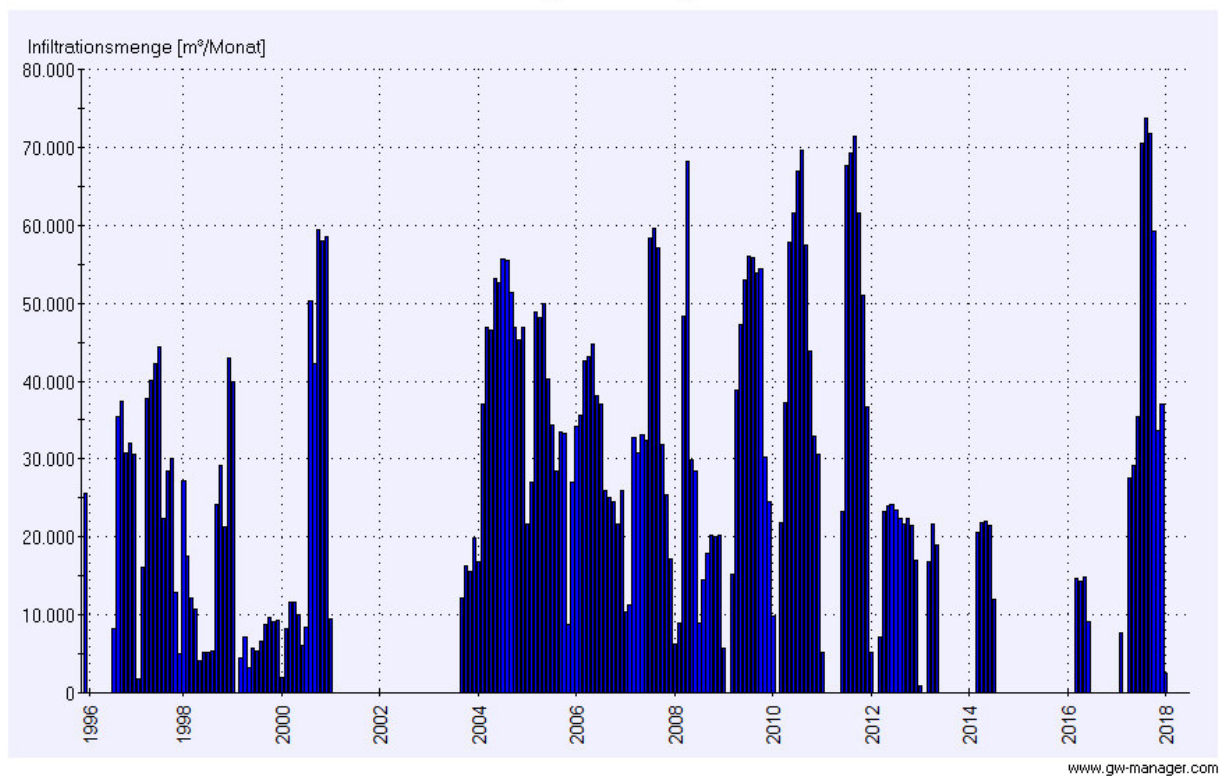


Abbildung B-4: Infiltrationsmenge am Organ 5 im Gernsheimer Wald von 1996 – 2018



## Infiltrationsmenge des Kohlbruchgrabens

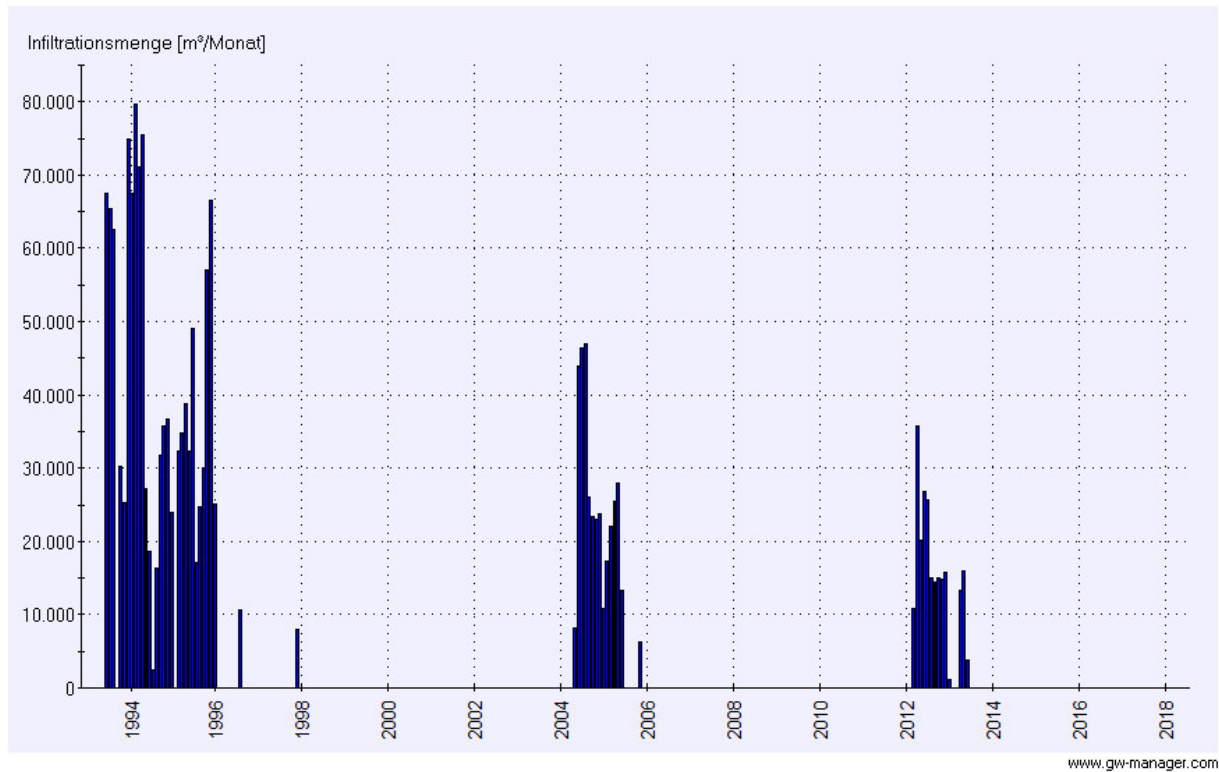


Abbildung B-5: Infiltrationsmenge des Kohlbruchgrabens von 1993 – 2018

## Infiltrationsmenge am Organ 5 im Jägersburger Wald

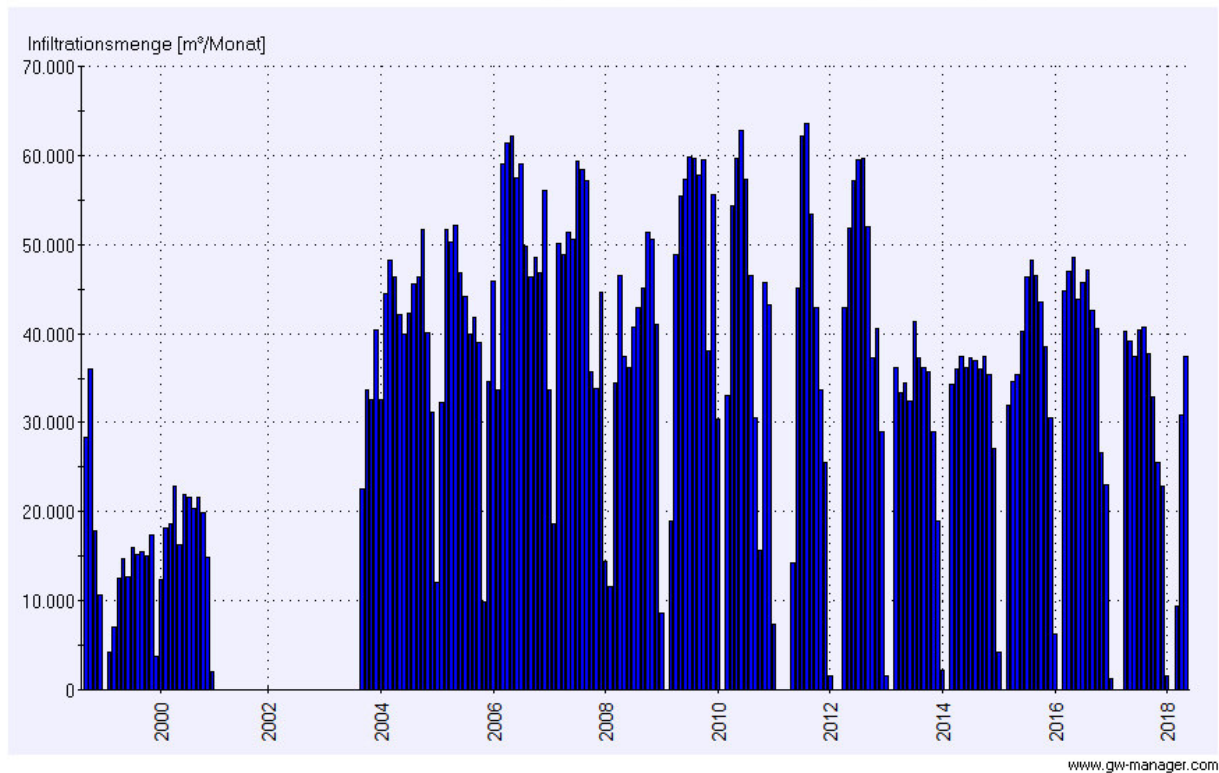


Abbildung B-6: Infiltrationsmenge am Organ 5 im Jägersburger Wald von 1999 – 2018

### Infiltrationsmenge am Organ 7 im Jägersburger Wald

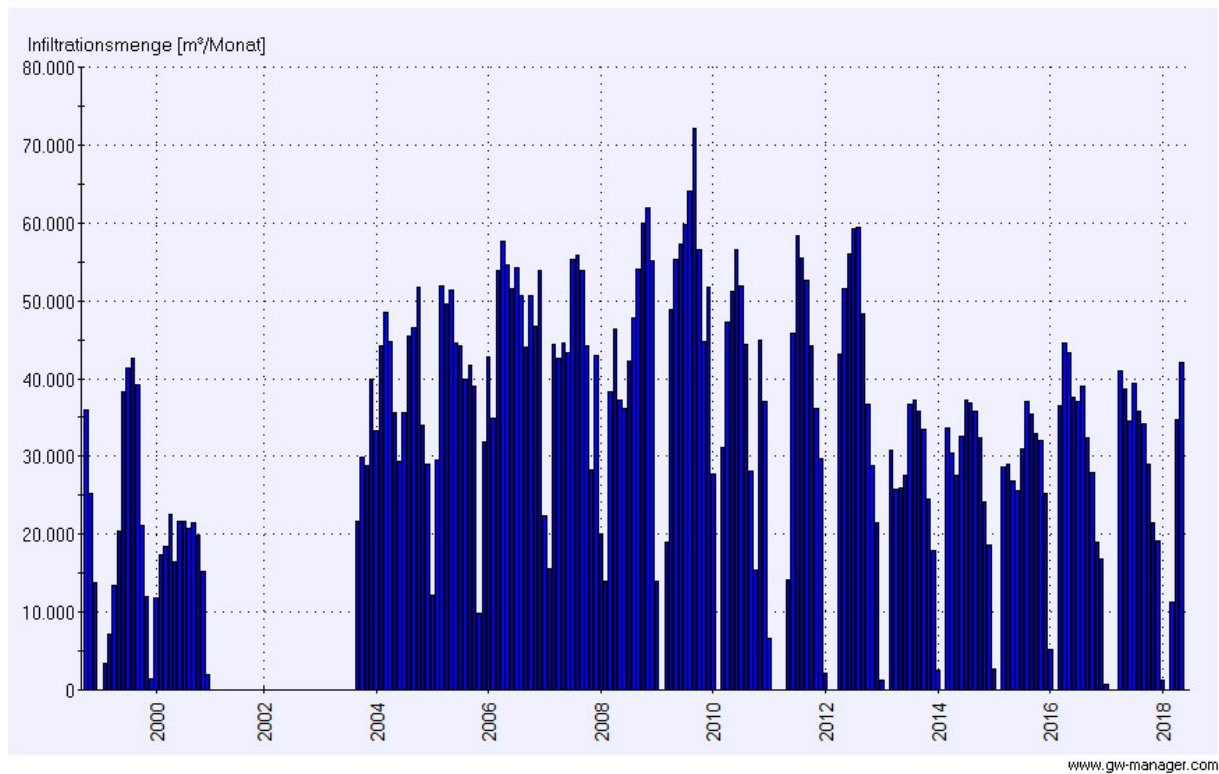


Abbildung B-7: Infiltrationsmenge am Organ 7 im Jägersburger Wald von 1999 - 2018

### Infiltrationsmenge am Organ 8 im Jägersburger Wald

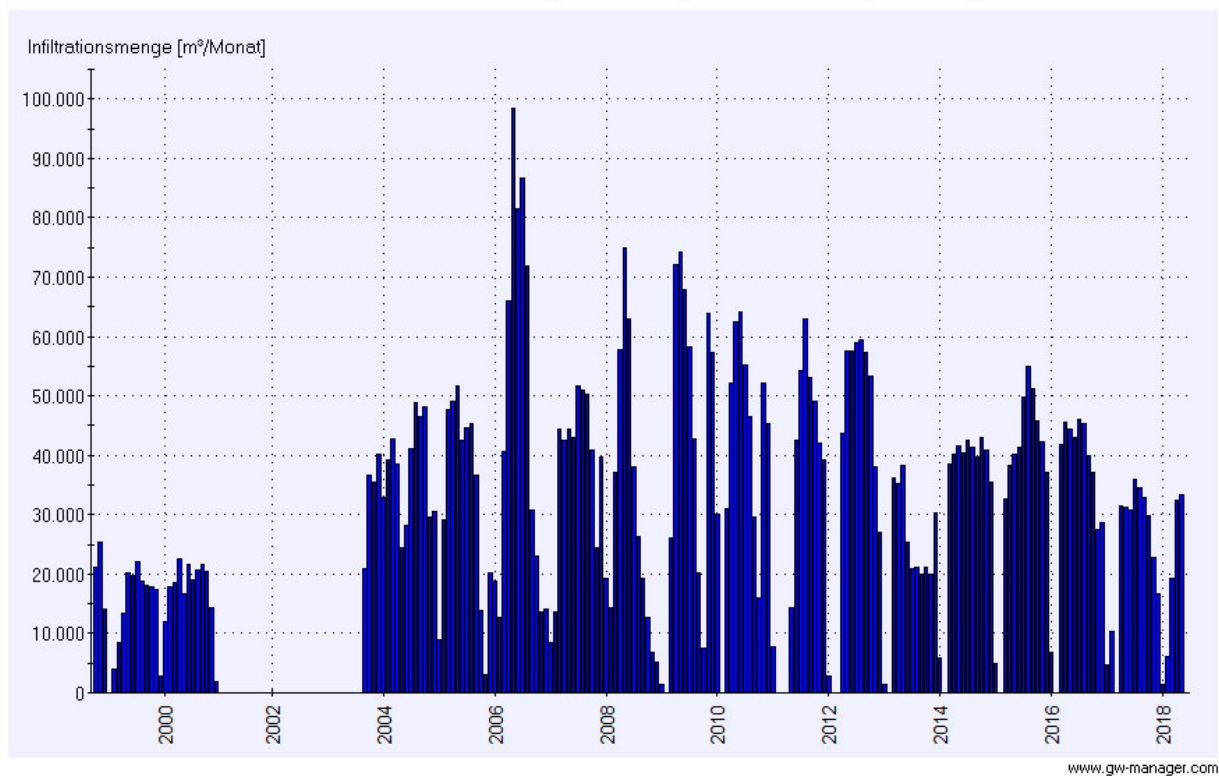


Abbildung B-8: Infiltrationsmenge am Organ 8 im Jägersburger Wald von 1999 - 2018



## Infiltrationsmenge am Organ 9 im Jägersburger Wald

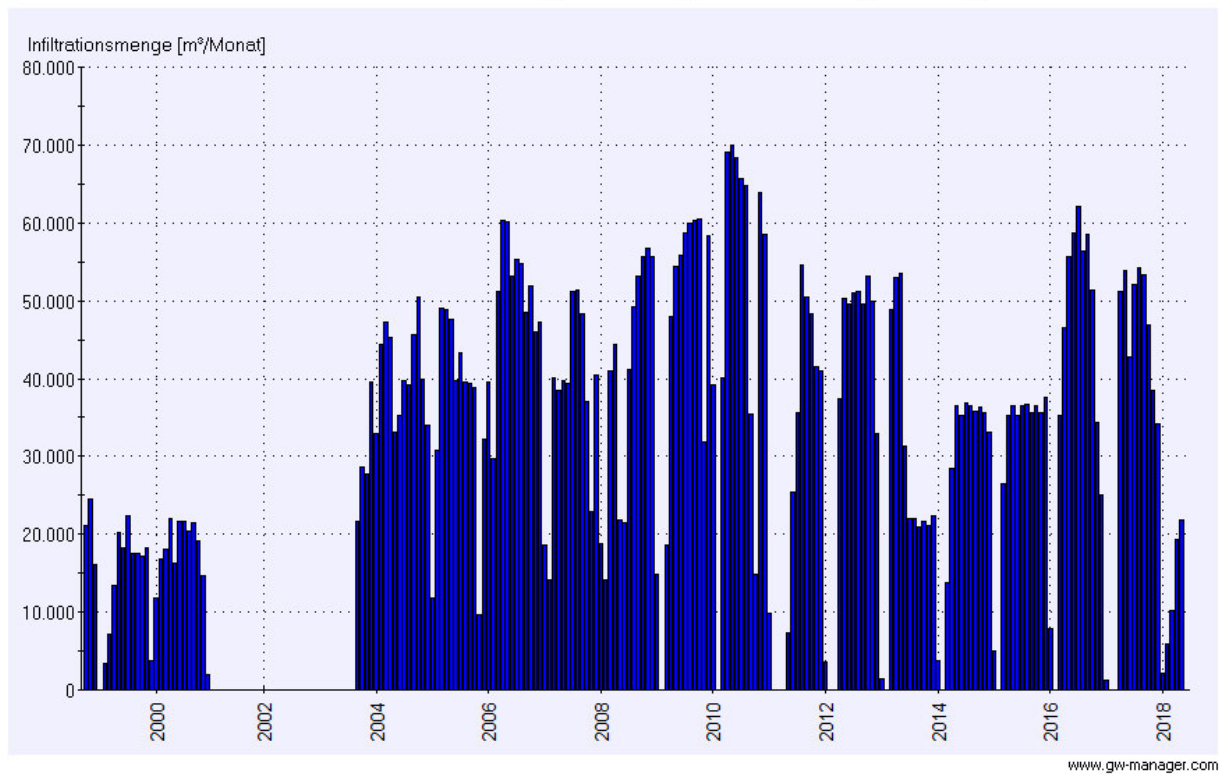


Abbildung B-9: Infiltrationsmenge am Organ 9 im Jägersburger Wald von 1999 - 2018

## Anlage C: Fotoaufnahmen, Lage- und Ausbaupläne der Infiltrationsorgane

### C.1: Modell Kiesbohrlöcher



Abbildung C-1: Mess- und Regelbauwerk des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald (1)



Abbildung C-2: Mess- und Regelbauwerk des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald (2)



Abbildung C-3: Einrichtung zur Messung der Durchflussmengen der einzelnen Kiesbohrlöchern des Organs 6





Abbildung C-4: Schachtdeckel des Kiesbohrlochs A des Organs 6



Abbildung C-5: Schachttöffnung und eingebrachte Rammfilterlanzen



Abbildung C-6: Blick in das Kiesbohrloch

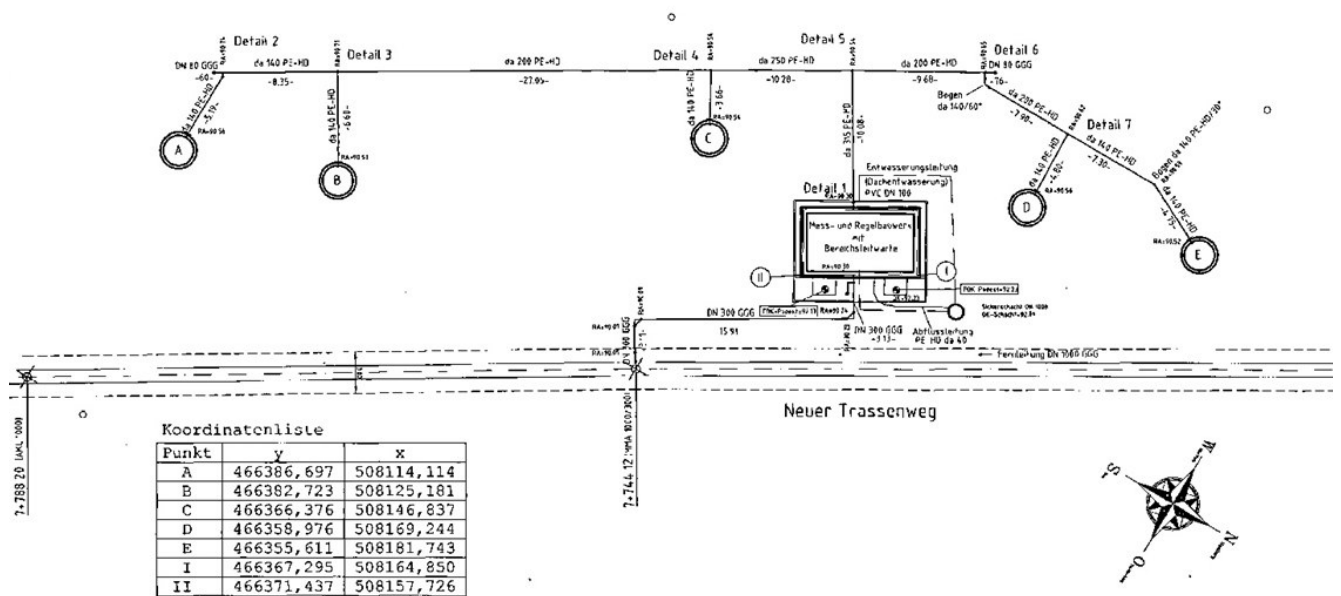


Abbildung C-7: Lageplan des Infiltrationsorgans 5 im Jägersburger Wald



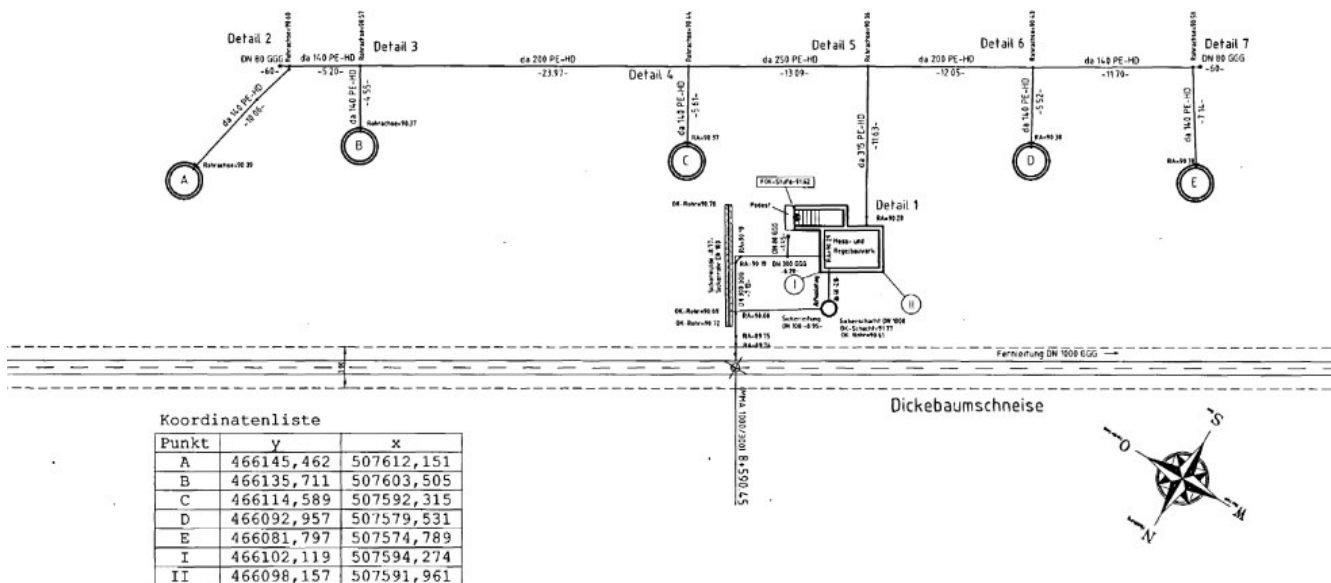


Abbildung C-8: Lageplan des Infiltrationsorgans 7 im Jägersburger Wald

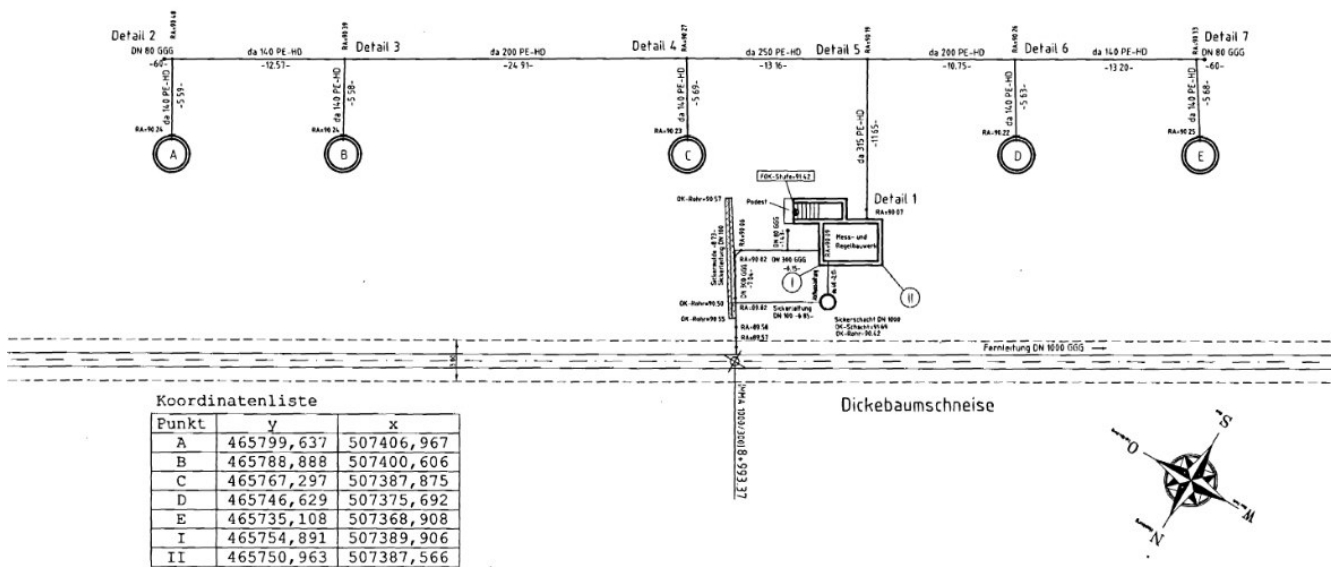
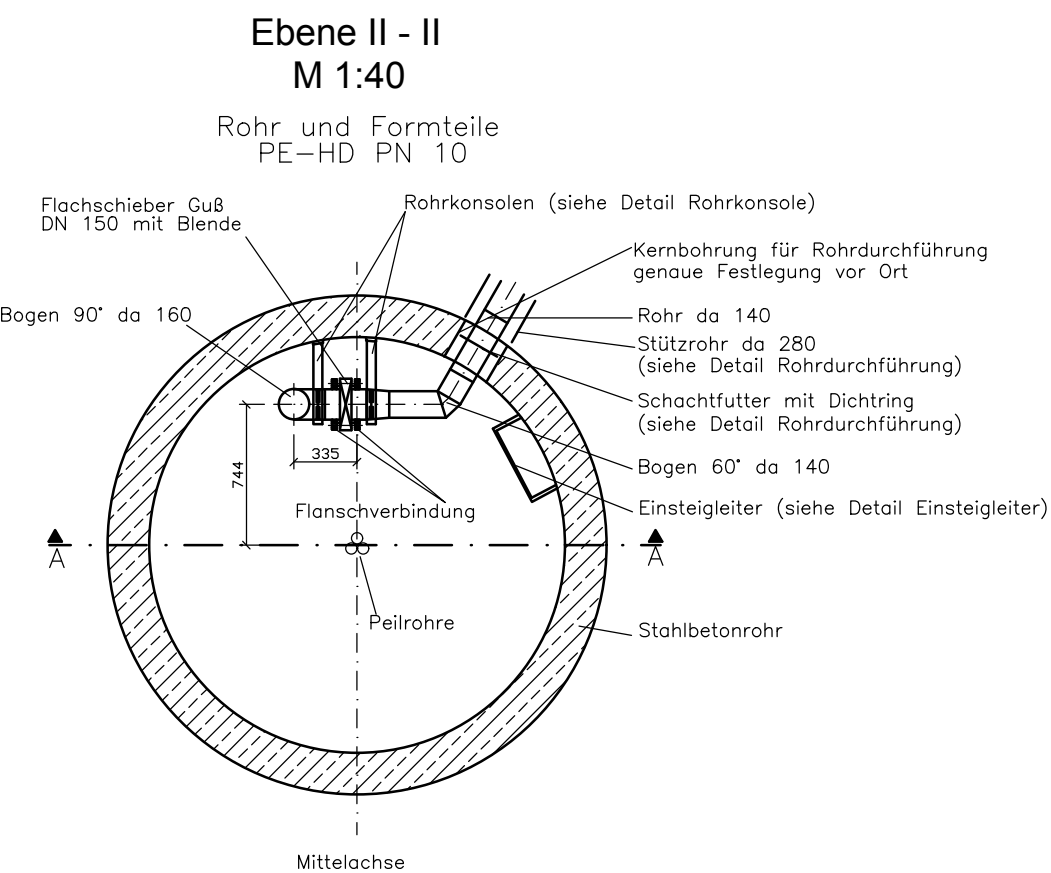


Abbildung C-9: Lageplan des Infiltrationsorgans 8 im Jägersburger Wald

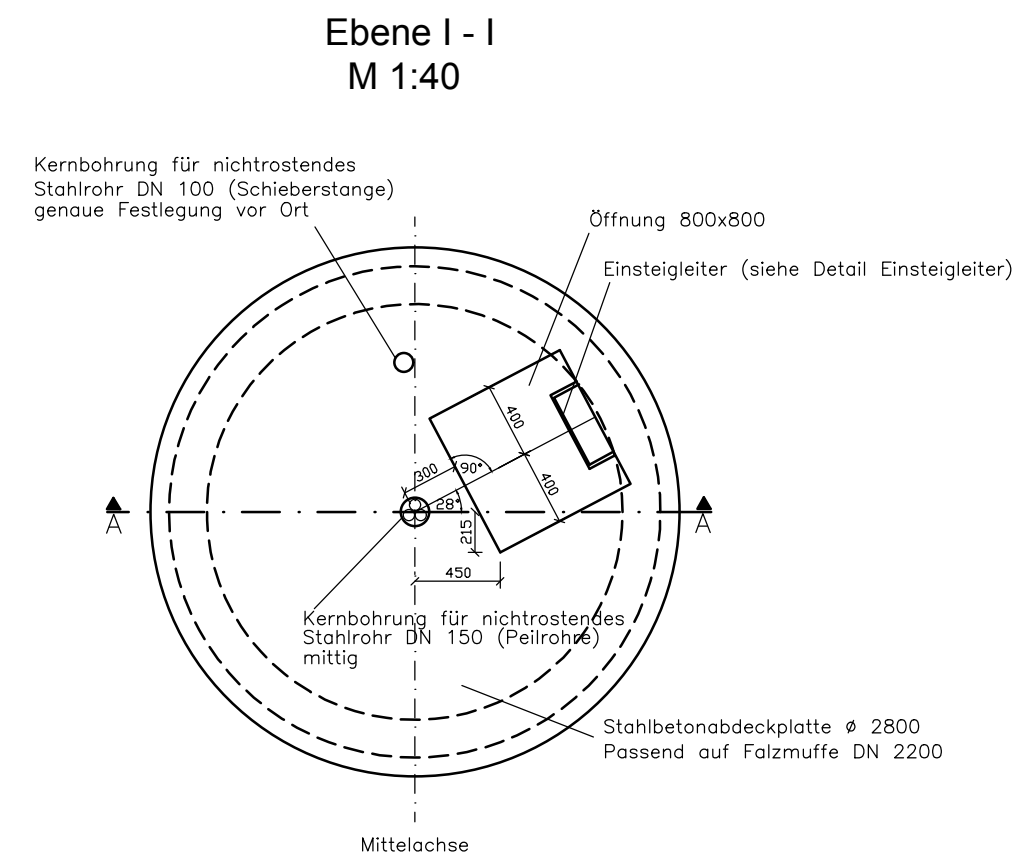




Rohr und Formteile  
PE-HD PN 10



Vermaßung der Einbauteile  
in Ebene 1-1



Technical drawing of a vertical well structure, showing a cross-section with three filter sections. The well is centered (Zentrierung) and has a full wall (Vollwandrohr). The top of the well is at GOK ±0.00. The bottom is labeled Endteufe. The drawing includes labels for the Peilrohr (water level gauge), Filterrohr 1, Bodenkappe (bottom cap), Filterrohr 2, Bodenkappe, Filterrohr 3, and Bodenkappe. Elevation markers on the right indicate depths of -4.0, -4.5, -6.5, -7.0, -8.5, and -9.0.

Rohr PE-HD PN 6  
da 160

C-Profil  
(siehe Detail Gitterrost)

Wandkonsole  
für C-Profil  
(siehe Detail Gitterrost)

Gitterrost  
(siehe Detail Gitterrost)

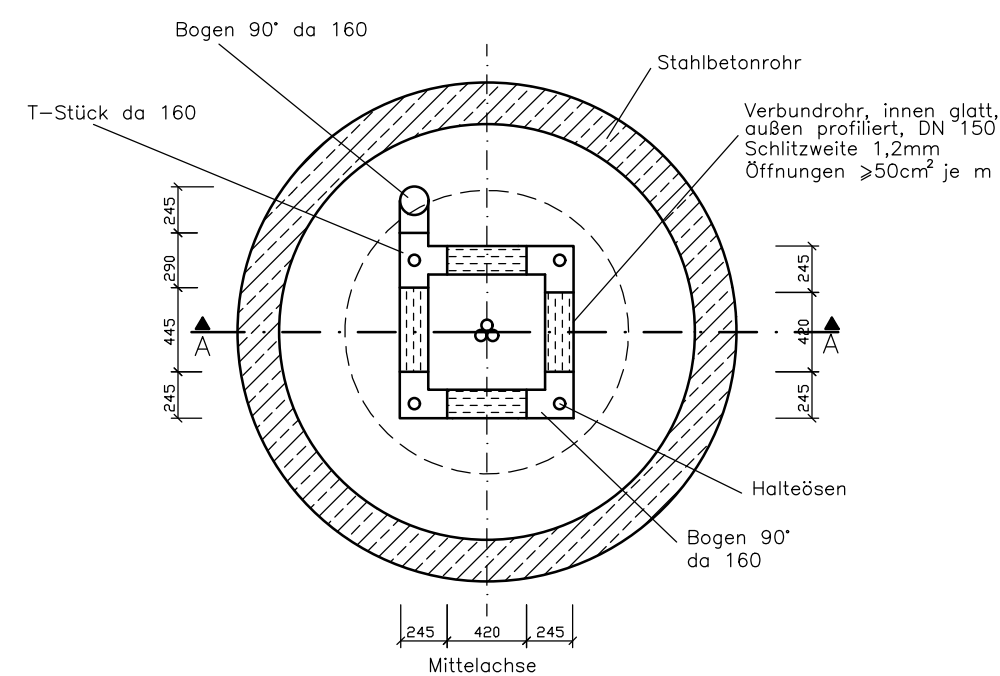
Stahlbetonrohr


3. C-Profil mit Wandkonsole  
ca. 2075–2125

185  
400  
505

A

Mittelachse

Rohr und Formteile  
PE-HD

	<b>Wasserverband Hessisches Ried</b> Taunusstraße 100 64521 Groß-Gerau	Anlage:  <div style="text-align: right; font-size: 2em;">I-5</div>
	Projekt :  <div style="text-align: center;"> <b>Wasserrechtsverfahren            Infiltrationsanlage Jägersburger Wald</b> </div>	Maßstab:  <div style="text-align: right; font-size: 1.5em;">1:20</div>
Planbezeichnung:  <div style="text-align: center;"> <b>Regelzeichnung            Einzelbohrung und Kopfausbildung</b> </div>		Datei: 4373-004.dwg
		Layout: Anlage I-5
		Bearb.: Bil.
Bearbeitet durch:  <div style="font-size: 2.5em; font-weight: bold;">BGS UMWELT</div> Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH	Tel (0 61 51) 94 56-0 • Fax (0 61 51) 94 56-80 <a href="http://www.bgsumwelt.de">www.bgsumwelt.de</a> • <a href="mailto:info@bgsumwelt.de">info@bgsumwelt.de</a> An der Eschollmühle 28 • D-64297 Darmstadt	Gez.: Kes.  Datum: Juni 2005  Projekt- nummer: 4373

## C.2: Modell Sickerschlitzen:



Abbildung C-11: Mess- und Regelbauwerk des Sickerschlitzengrabens im Gernheimer Wald



Abbildung C-12: Sickerschlitzengraben im Gernheimer Wald



Abbildung C-13: Blick in den Sickerschlitzengraben, Verbundsickerrohr und zwei Rammfilterlanzen (1)





Abbildung C-14: Blick in den Sickerschlitzgraben, Verbundsickerrohr und zwei Rammfilterlanzen (2) [WHR]

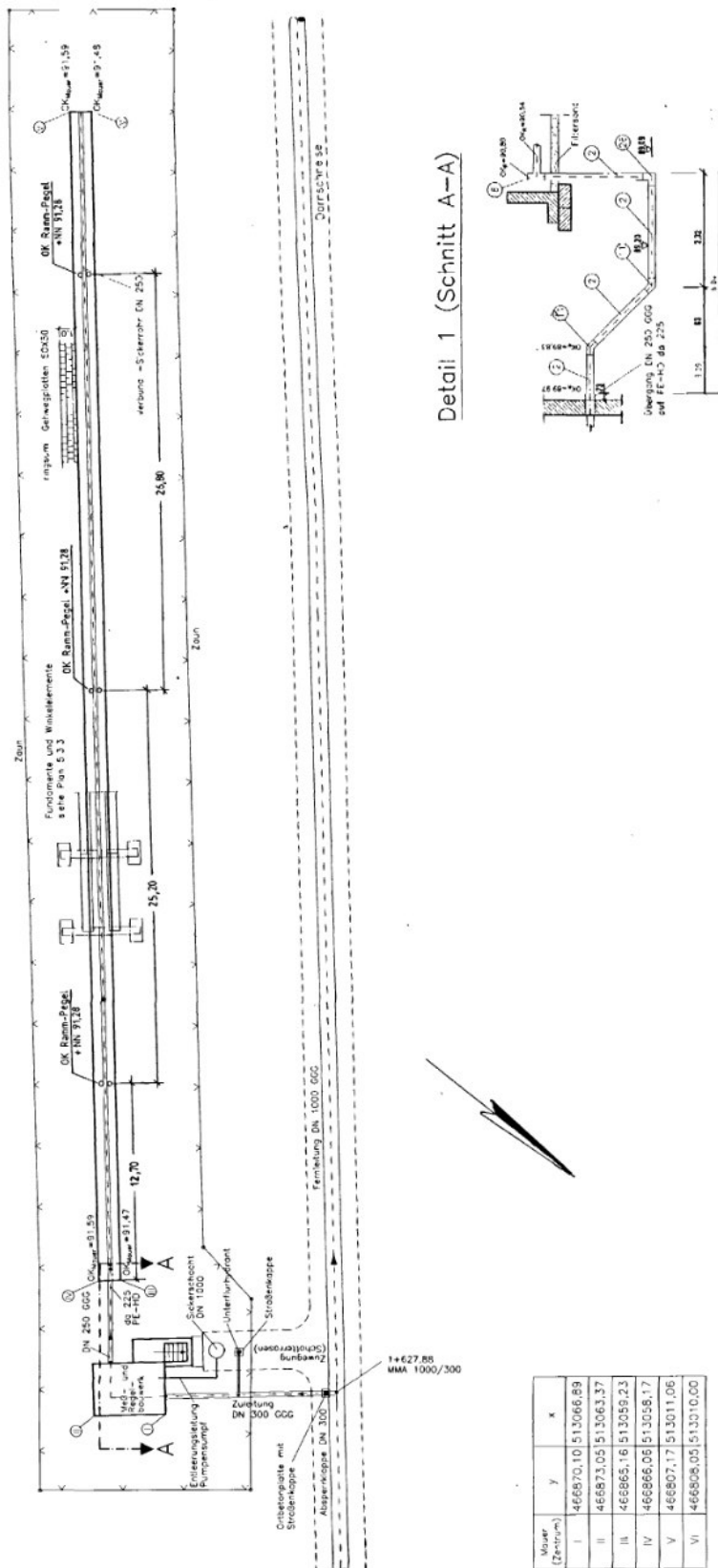
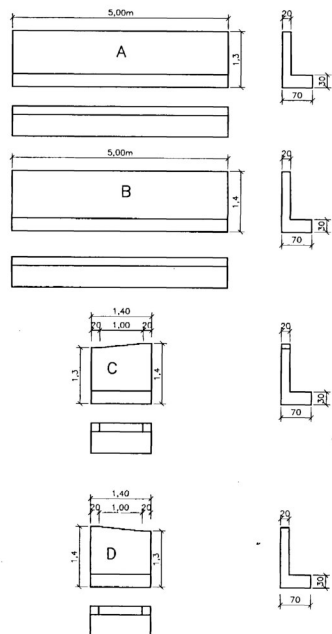


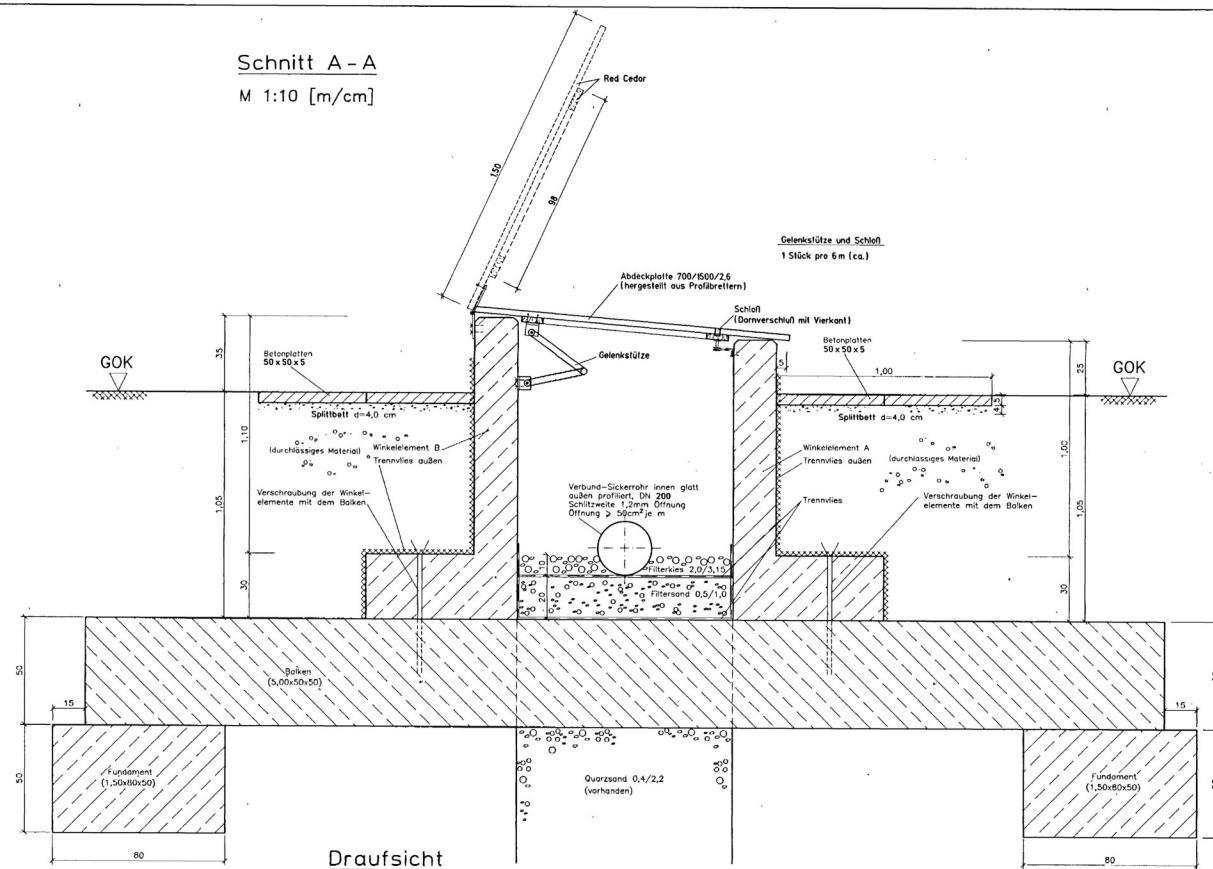
Abbildung C-15: Lageplan des Infiltrationsorgans 2 im Gernsheimer Wald



Winkelelemente A - D  
M 1:50 [m/cm]

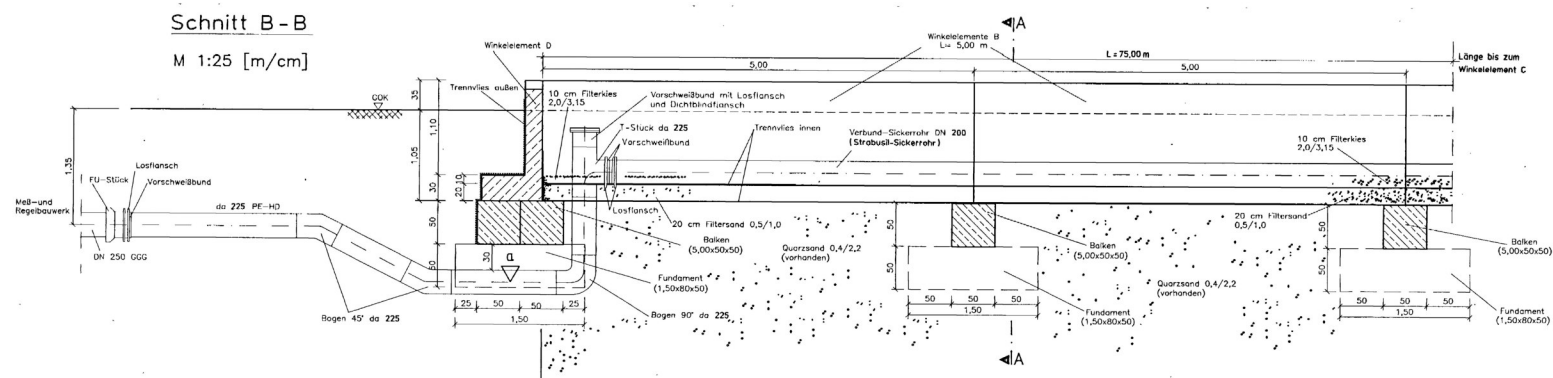


Schnitt A - A  
M 1:10 [m/cm]



Schnitt B - B

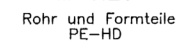
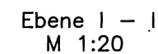
M 1:25 [m/cm]



Bauschaftung	Firma HOCHTIEF Frankfurt																	
Planung und Bauleitung	Dipl.-Ing. Horst Unger Ingenieurbüro für Wasserbau und Straßenbauwesen in Lamsbachtal mit Ing.-Büro Gölucke GmbH																	
Bauherr	 																	
Wasserbauverband Hessisches Ried																		
Projekt	Infiltrationsanlagen Gernsheimer Wald BESTAND Infiltrationsorgans 2, Sickerschiltz																	
Planzeichnung																		
<table border="1"> <tr> <td>BY</td> <td>WA</td> <td>03/17/08</td> <td>MASSTAB</td> <td>BLATT-NR.</td> </tr> <tr> <td>SB</td> <td>PL</td> <td>2/KK</td> <td>1:10, 1:25</td> <td>5.33</td> </tr> <tr> <td>GEFÜ</td> <td>PL</td> <td>FÜHRT</td> <td>105 x 82</td> <td></td> </tr> </table>	BY	WA	03/17/08	MASSTAB	BLATT-NR.	SB	PL	2/KK	1:10, 1:25	5.33	GEFÜ	PL	FÜHRT	105 x 82		Anzahl der Flächen  Planungsgemeinschaft		
BY	WA	03/17/08	MASSTAB	BLATT-NR.														
SB	PL	2/KK	1:10, 1:25	5.33														
GEFÜ	PL	FÜHRT	105 x 82															
  Der Bauherr																		

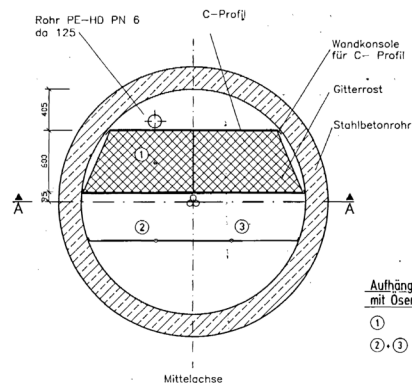
Rohr und Formteile  
PE-HD PN 6 da 125

Vermaßung der Einbauteile  
in Ebene 1-1

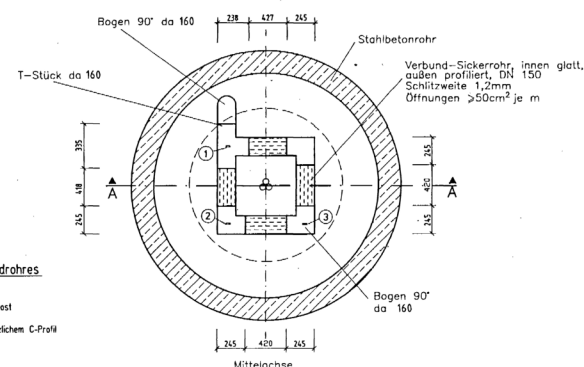


Technical drawing of a well construction showing a cross-section of a shaft with a full wall (Vollwandrohr) and a piezometer tube (Piezorrohr). The shaft is equipped with three filter tubes (Filterrohr 1, 2, 3) and bottom caps (Bodenkappe) at depths of -3.0, -4.0, -5.0, and -6.0 meters. The drawing also shows the ground level (GOK ±0.00) and the end of the shaft (Endteufe).

Filterrohr	von Stat.	bis Stat.
1	-3,0	-5,0
2	-5,0	-7,0
3	-7,0	-9,0
Endteufe	9,0 m v. GOK	


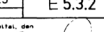
Rohr und Formteile  
PE-HD PN 6 da 125

①      Aufhängung an Gitterrost  
② + ③      Aufhängung an zusätzlichem C-Profil

Rohr und Formteile  
PE-HD

Fuchsbauer Elektrotechnik		 <b>STEINIGEWEG + PARTNER</b> Heintich-Felds-Weg 16, 64289 Darmstadt Tel.: 06151/9764-0 FAX 06151/9764 50																	
<table border="1"> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>																		Wir interessieren uns für Ihren Geschäftsbereich: <b>WEG</b> 029339-050	
Angeht Sie: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein E-Mail: <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein Name: <input type="text"/>		<b>ADD</b> NEU																	
Telefon: <input type="text"/>		<b>Elektroinstallation</b>																	

OK D und OK Rohr siehe  
Legenlänge 2.2.1 bis 2.2.18

Bauschaffung	Firma HOCHTIEF Frankfurt		
Planung und Realisierung	Dipl.-Ing. Horst Unger, Ingenieurbüro für Wasserbau und Stadtbauwesen in Zusammenarbeit mit Ing.-Büro Golueke GmbH		
			
Bauherr:	<b>Wasserverband Heeselsches Ried</b>		
Projekt:	Infiltrationsanlagen Gernsheimer Wald		
Planbestimmung	BESTAND		
Kopfausbildung Infiltrationsbrunnen	Regelzeichnung		
RZ	WA 0307/08	MISSTAB	BLATT-NR.
SB	RK - JK	1:10 / 1:20 / 1:25	E 53.2
GERB.	FÜHRHT 100 x 75		
Baustelle, den	Nachtr. den 1. Februar 1986  Planungsgemeinschaft		
Der Bauherr			

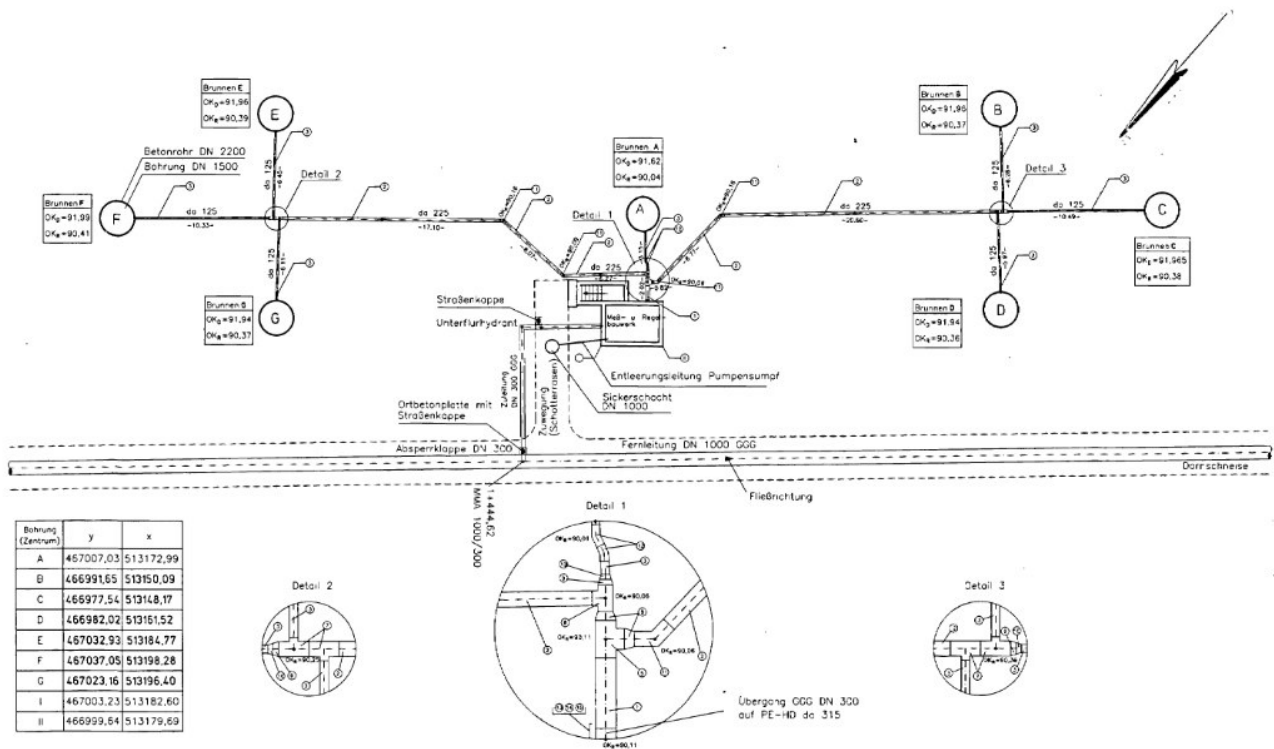


Abbildung C-16: Lageplan des Infiltrationsorgans 1 im Gernsheimer Wald

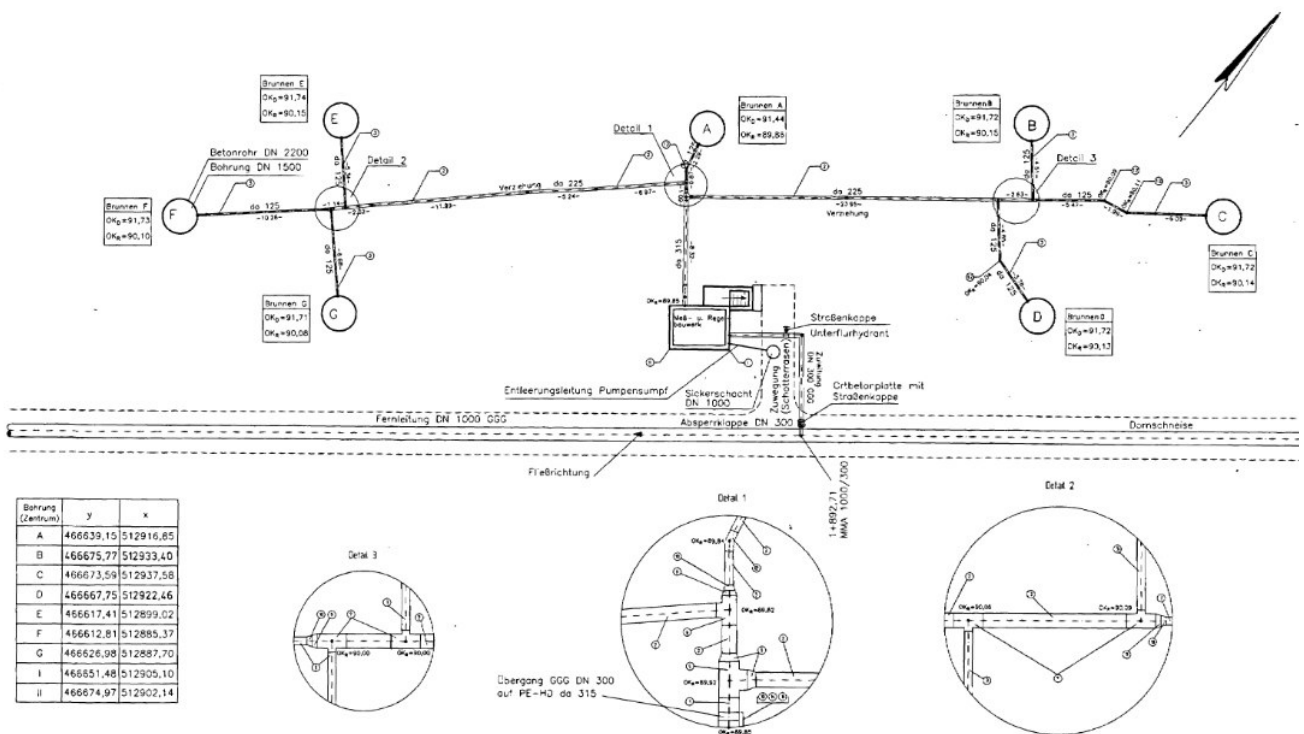


Abbildung C-17: Lageplan des Infiltrationsorgans 3 im Gernsheimer Wald

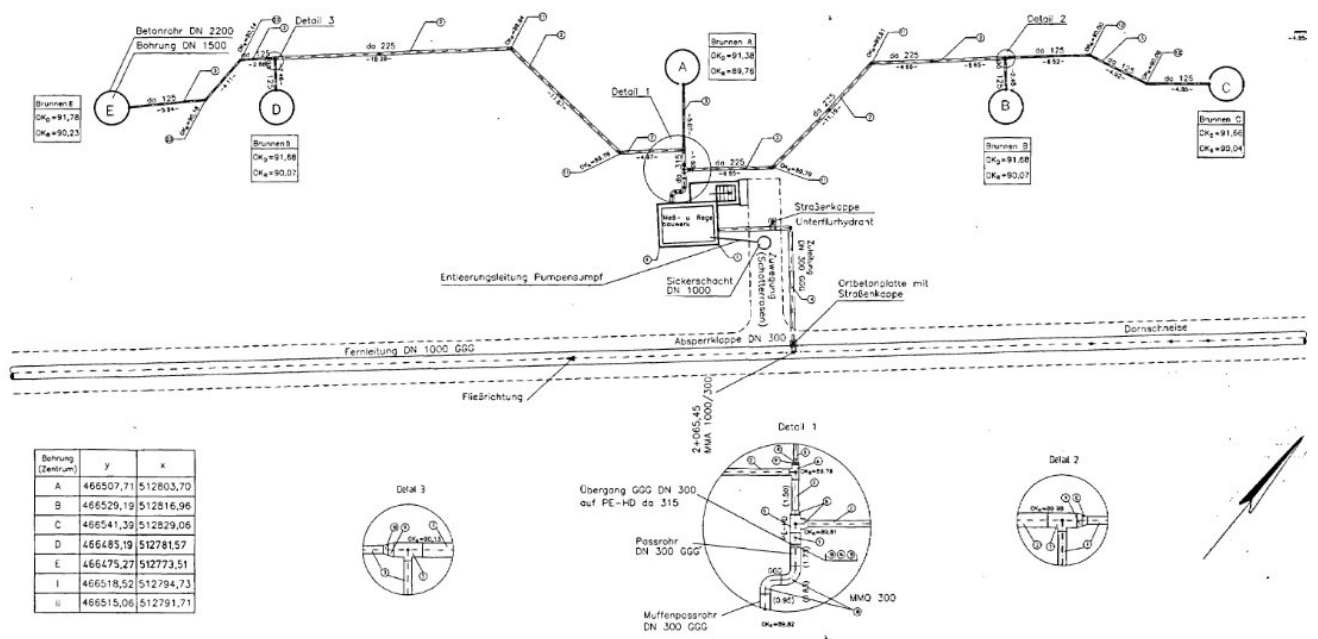


Abbildung C-18: Lageplan des Infiltrationsorgans 4 im Gernsheimer Wald

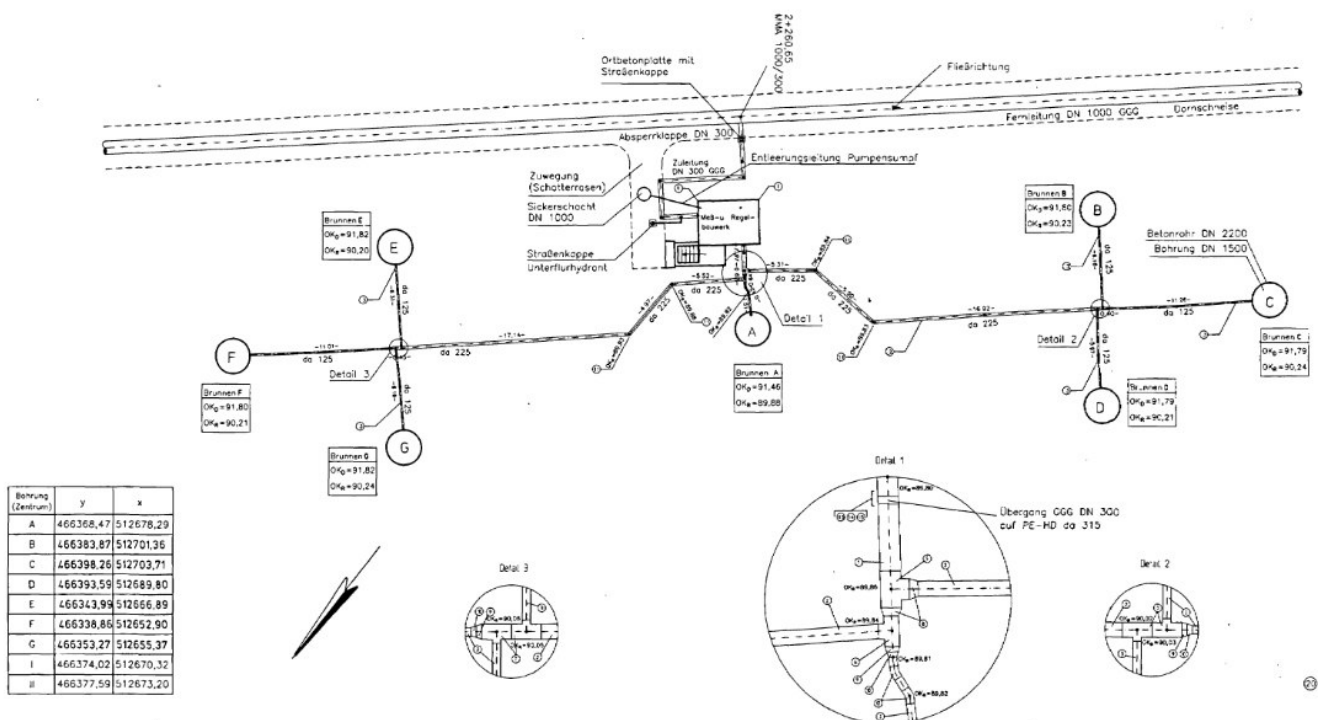
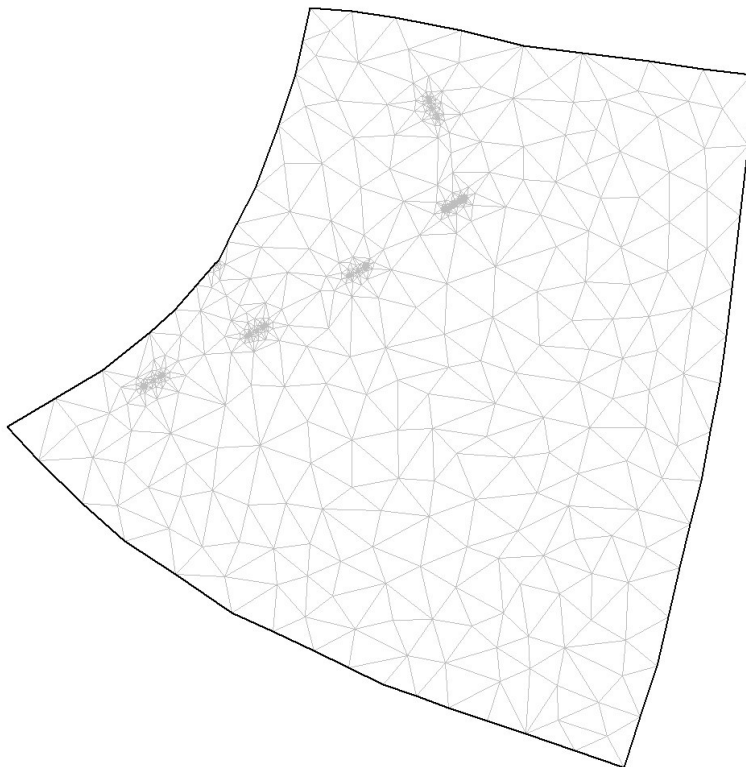


Abbildung C-19: Lageplan des Infiltrationsorgans 5 im Gernsheimer Wald



## Anlage D: Abbildungen des Modellaufbaus

### D.1: Modell Kiesbohrlöcher



0 137 274m

Abbildung D-1: Grundnetz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; gesamtes Netz



0 18 36m

Abbildung D-2: Grundnetz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Bereich Organe 6-7

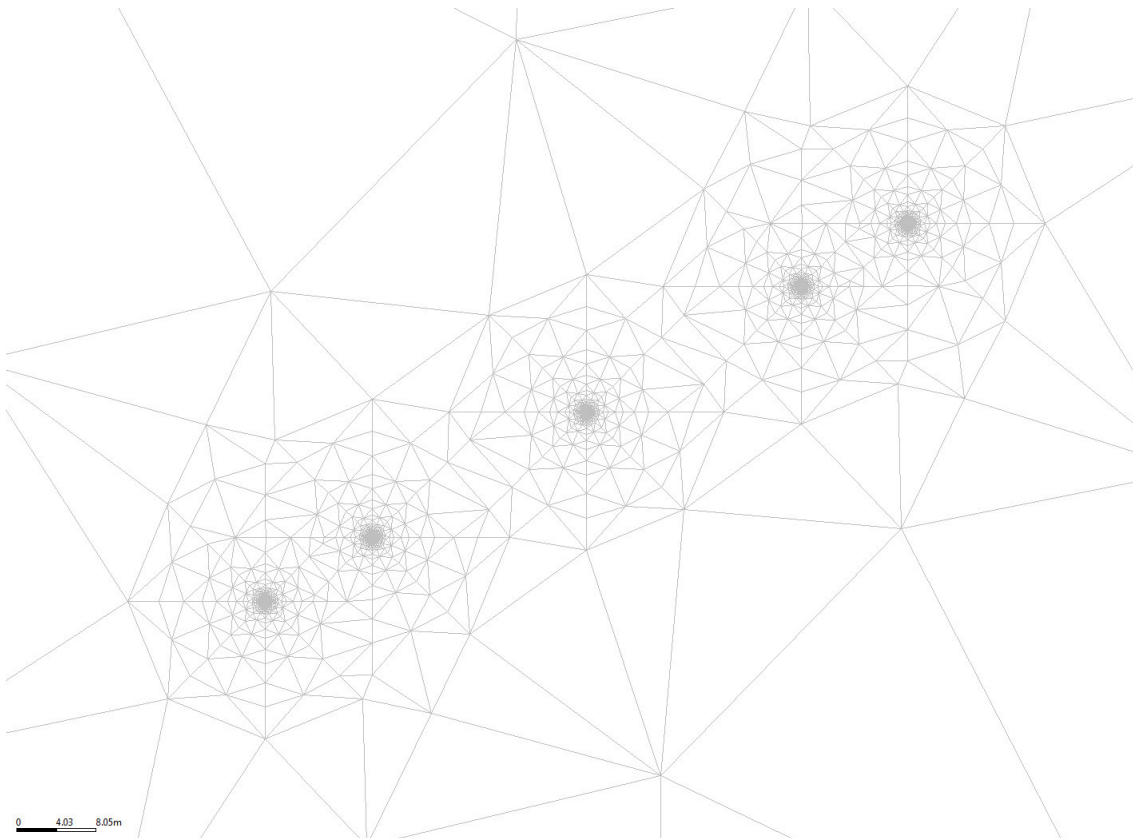


Abbildung D-3: Grundnetz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Nahbereich Organ 6

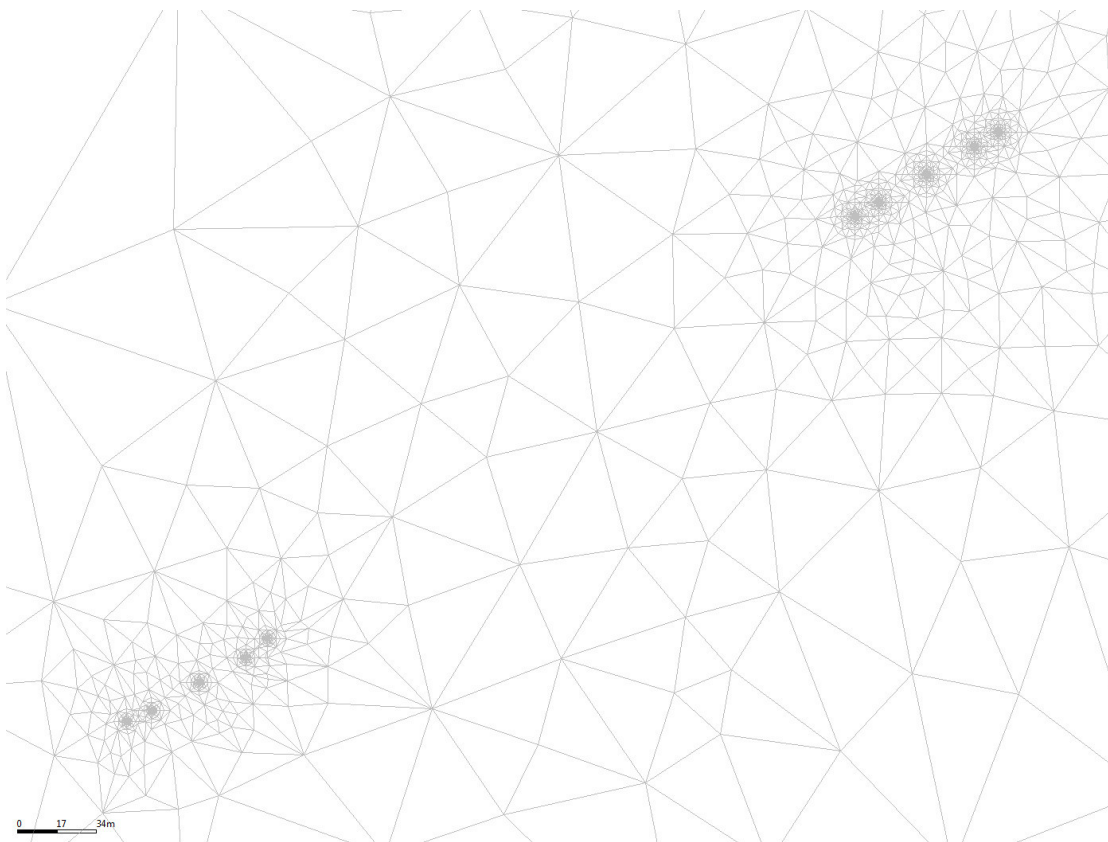


Abbildung D-4: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Bereich Organe 6-7

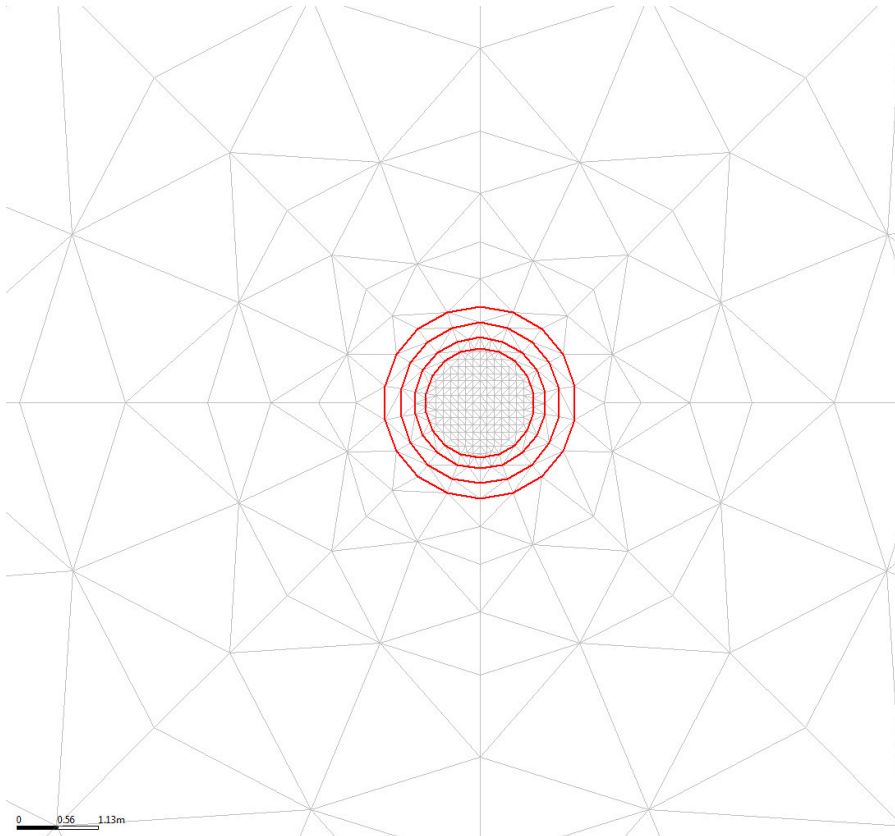


Abbildung D-5: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Jägersburger Wald; Nahbereich eines Kiesbohrlochs am Organ 6

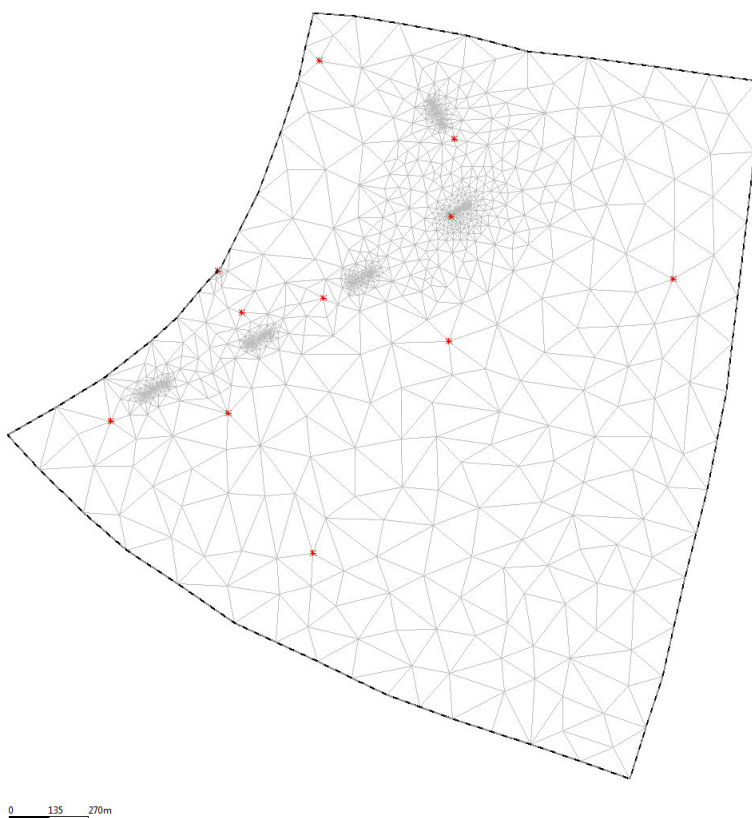


Abbildung D-6: Im Modellgebiet des Jägersburger Waldes enthaltene Grundwassermessstellen

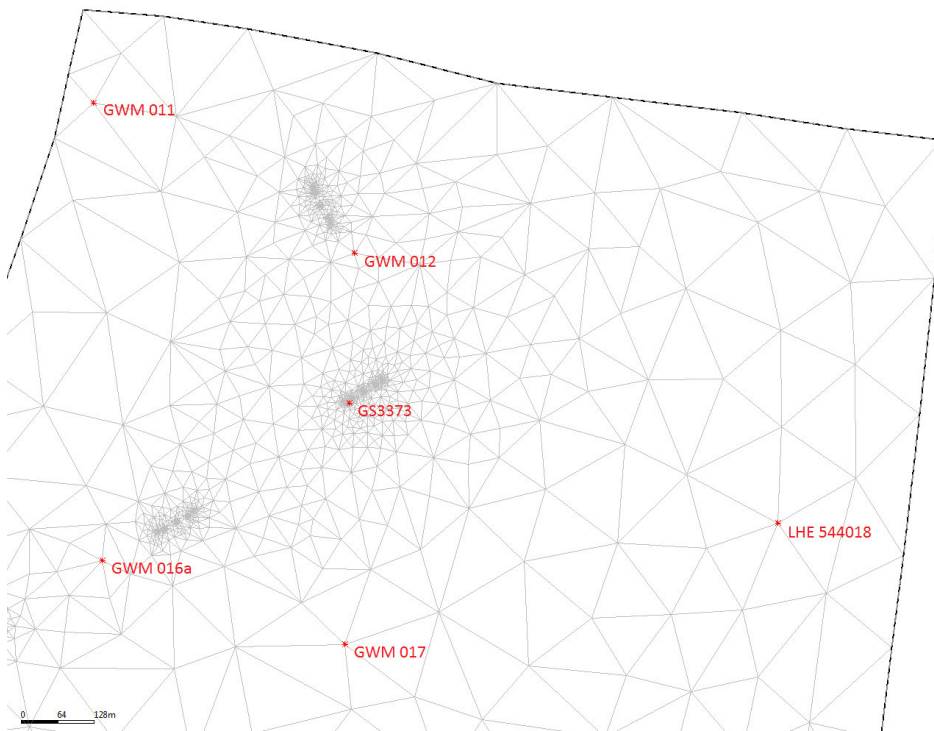


Abbildung D-7: Grundwassermessstellen im Umkreis des Infiltrationsorgans 6 im Jägersburger Wald

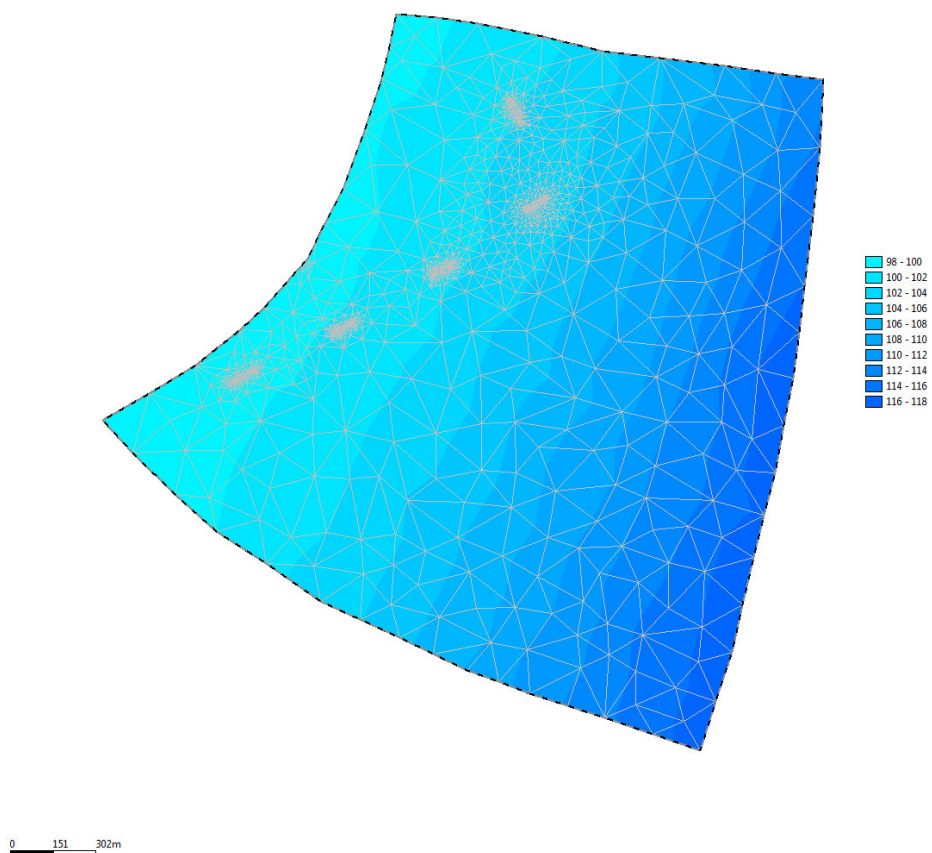


Abbildung D-8: Mächtigkeit des Grundwasserleiters im Modellgebiet Jägersburger Wald (Angabe in Metern)



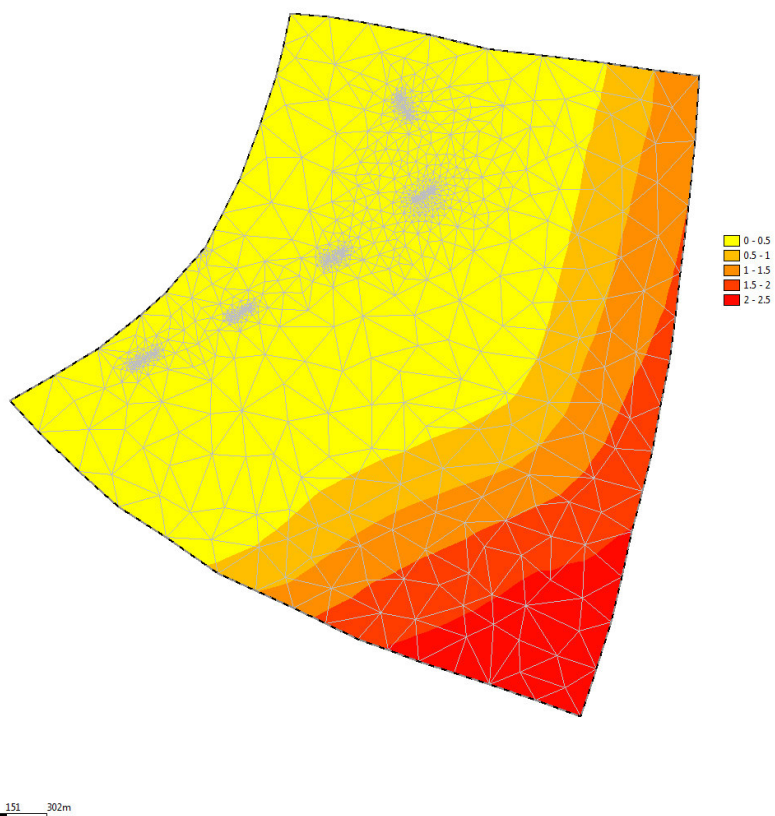


Abbildung D-9: Mächtigkeit der oberen Tonschicht im Modellgebiet des Jägersburger Waldes (Angabe in m)

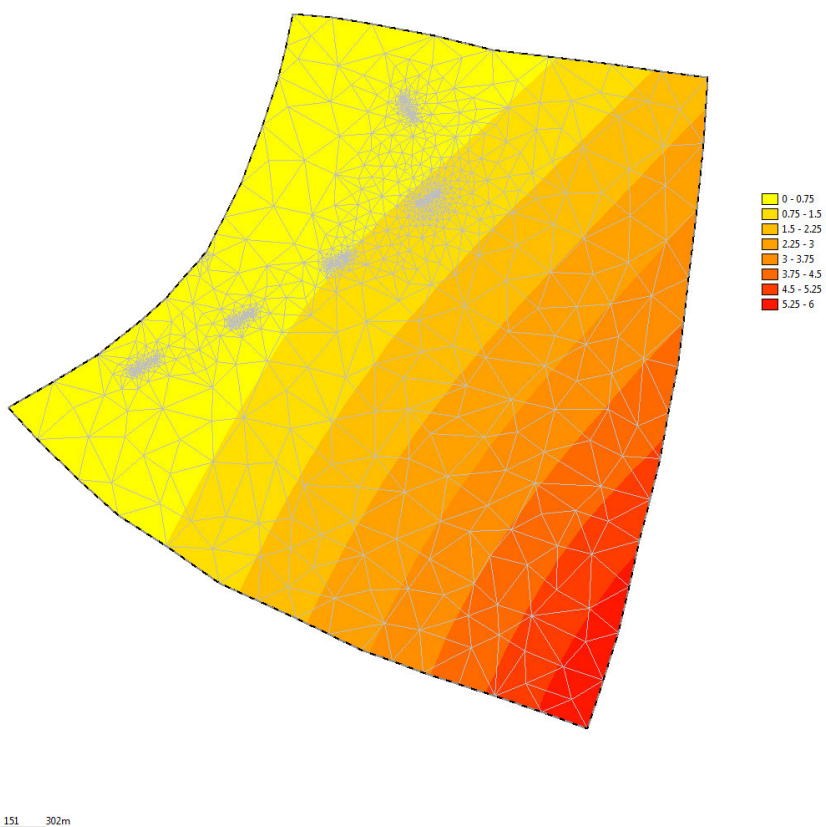


Abbildung D-10: Mächtigkeit der unteren Tonschicht im Modellgebiet des Jägersburger Waldes (Angabe in m)

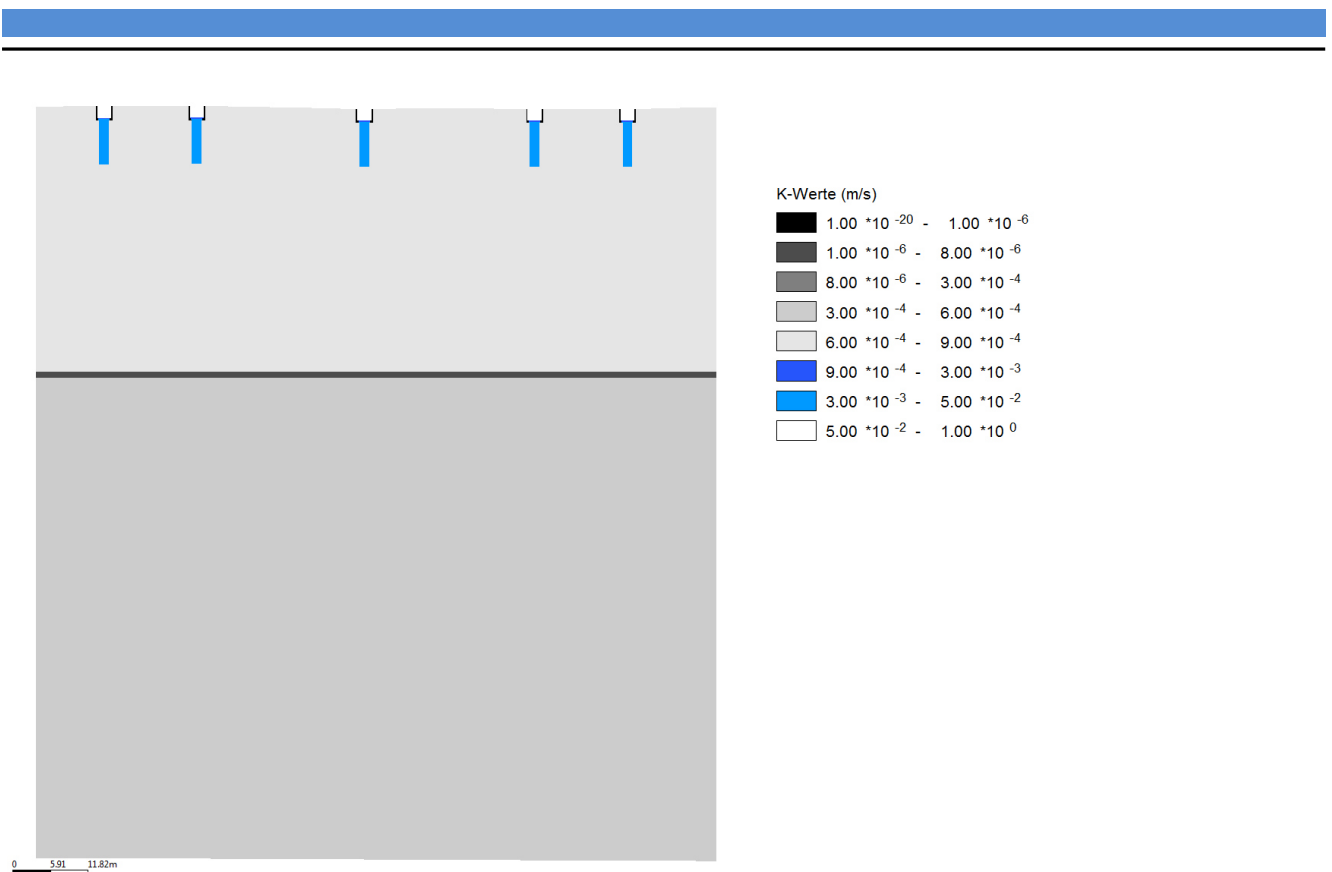


Abbildung D-11: Schnitt und Darstellung der Durchlässigkeit im Bereich des Infiltrationsorgans 6

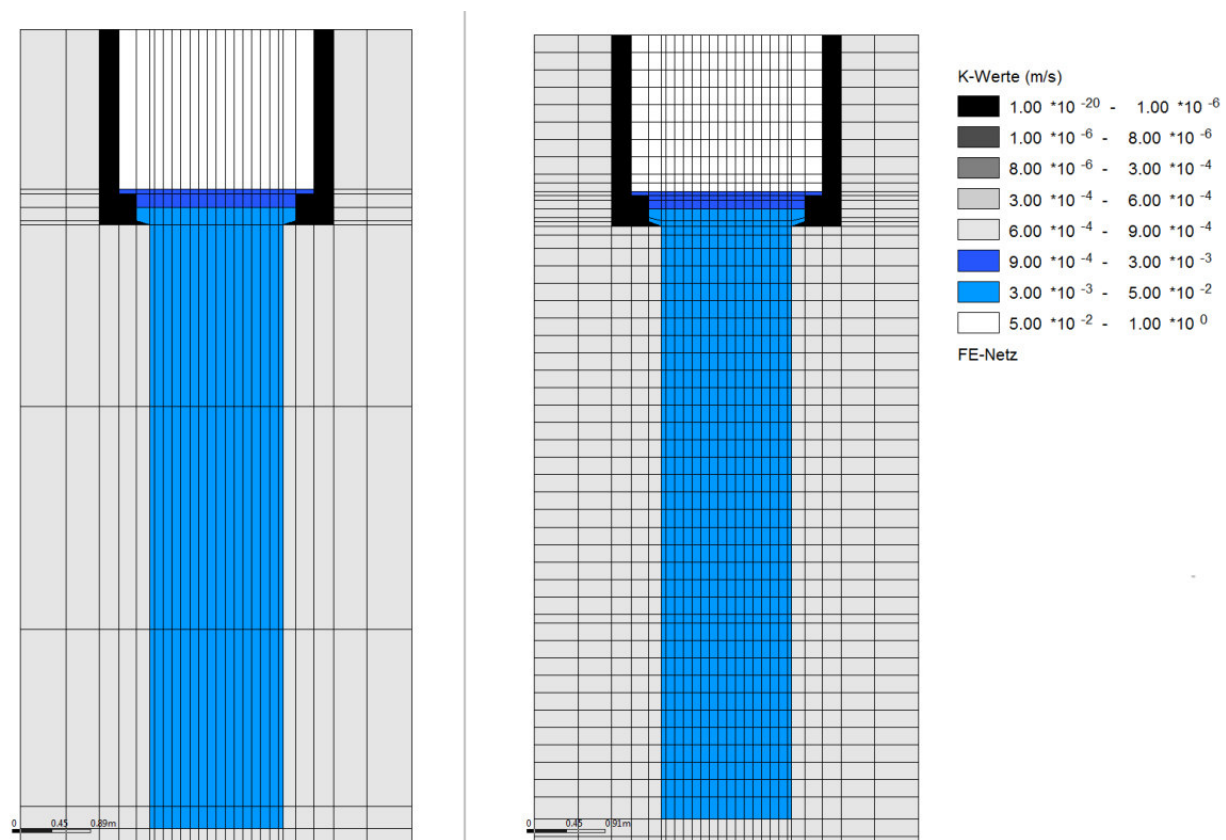


Abbildung D-12: Darstellung der Elementschichten im Nahbereich des Bohrlochs A des Organs 6 durch die Zwangspunkte (links) und die finale Schichteinteilung (rechts)

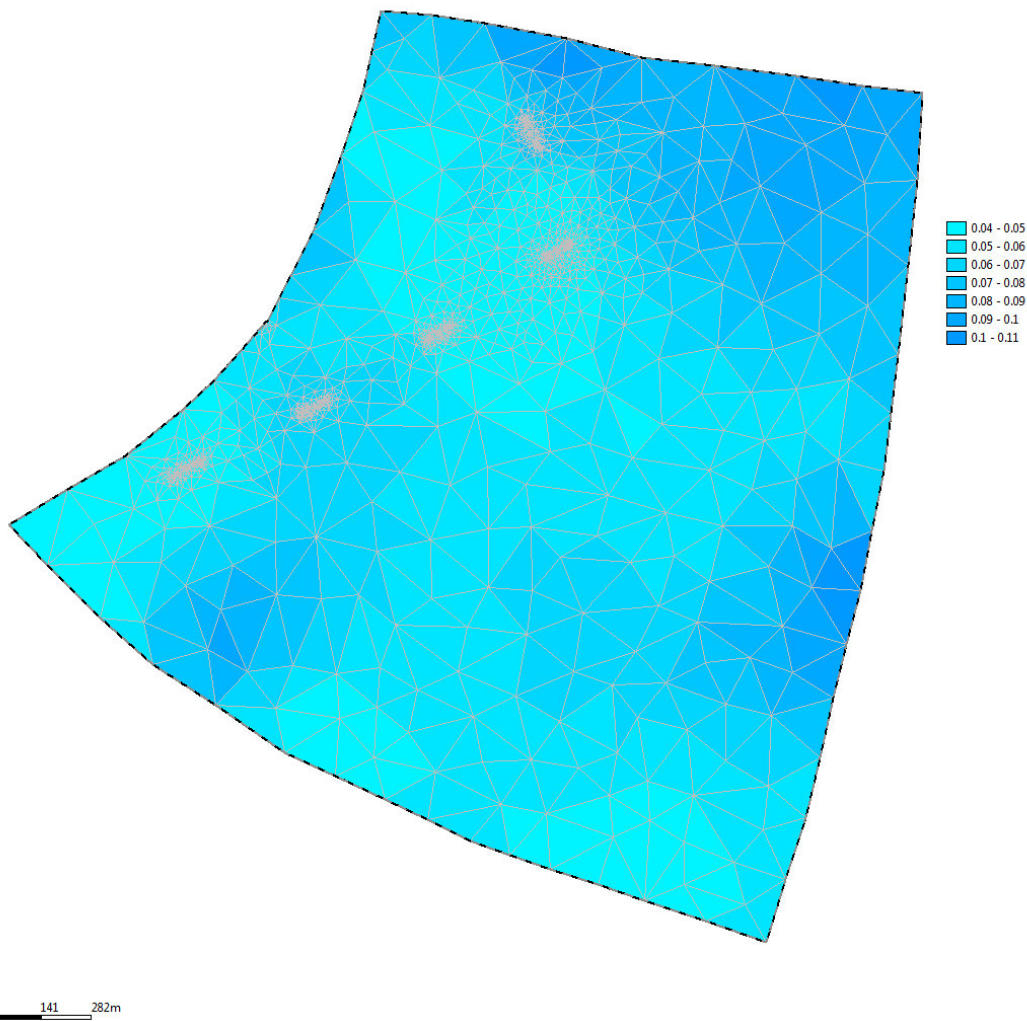


Abbildung D-13: Grundwasserneubildung im Modellgebiet Jägersburger Wald (Angabe in  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )

## D.2: Modell Sickerschlitzengraben

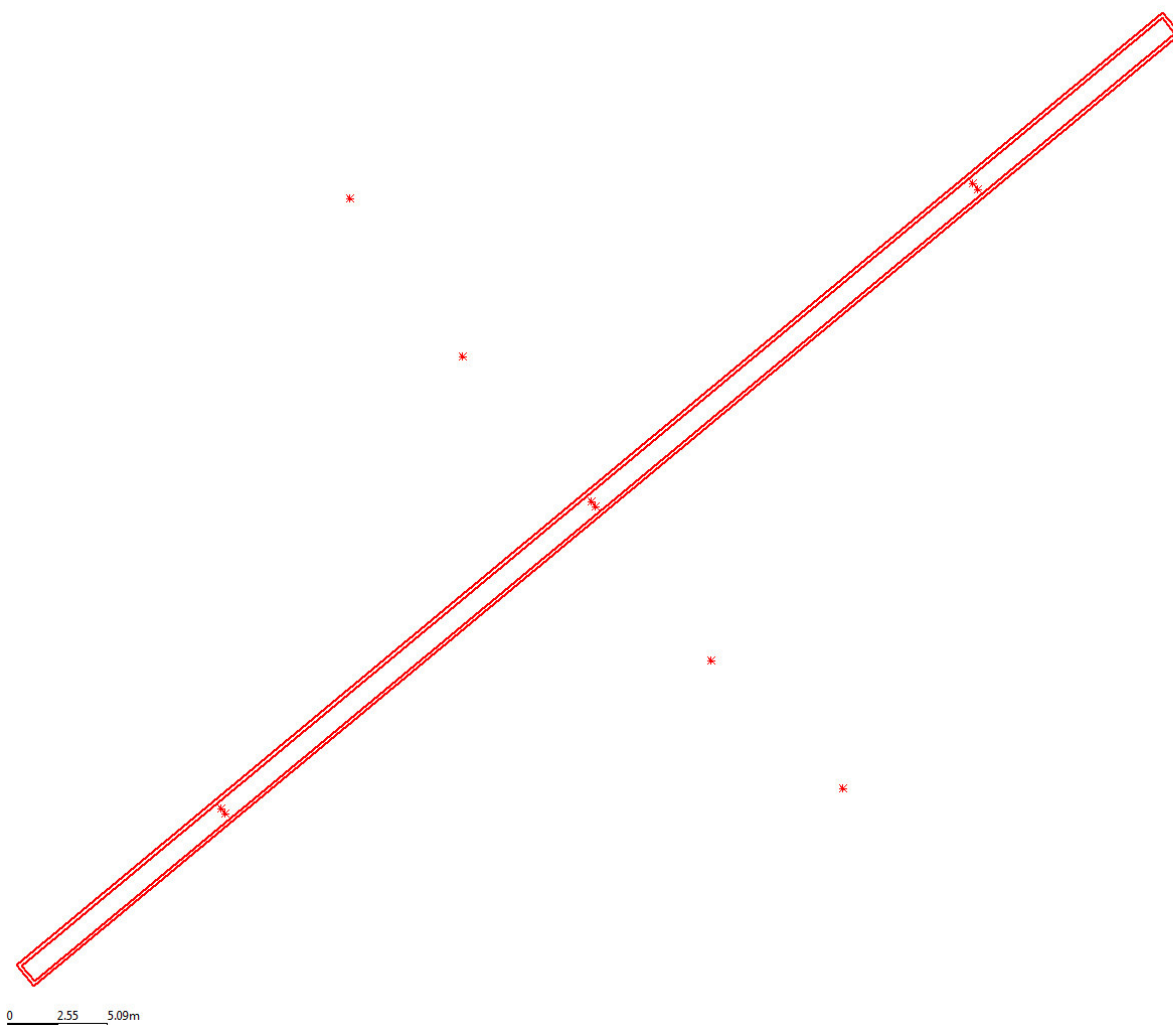


Abbildung D-14: Struktur des Sickerschlitzengrabens inklusive der Rammfilterlanzen und einiger Grundwassermessstellen

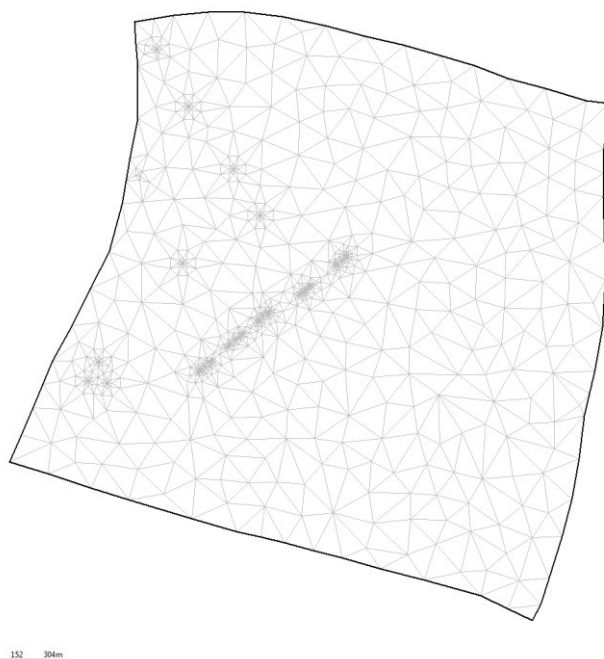


Abbildung D-15: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; gesamtes Netz



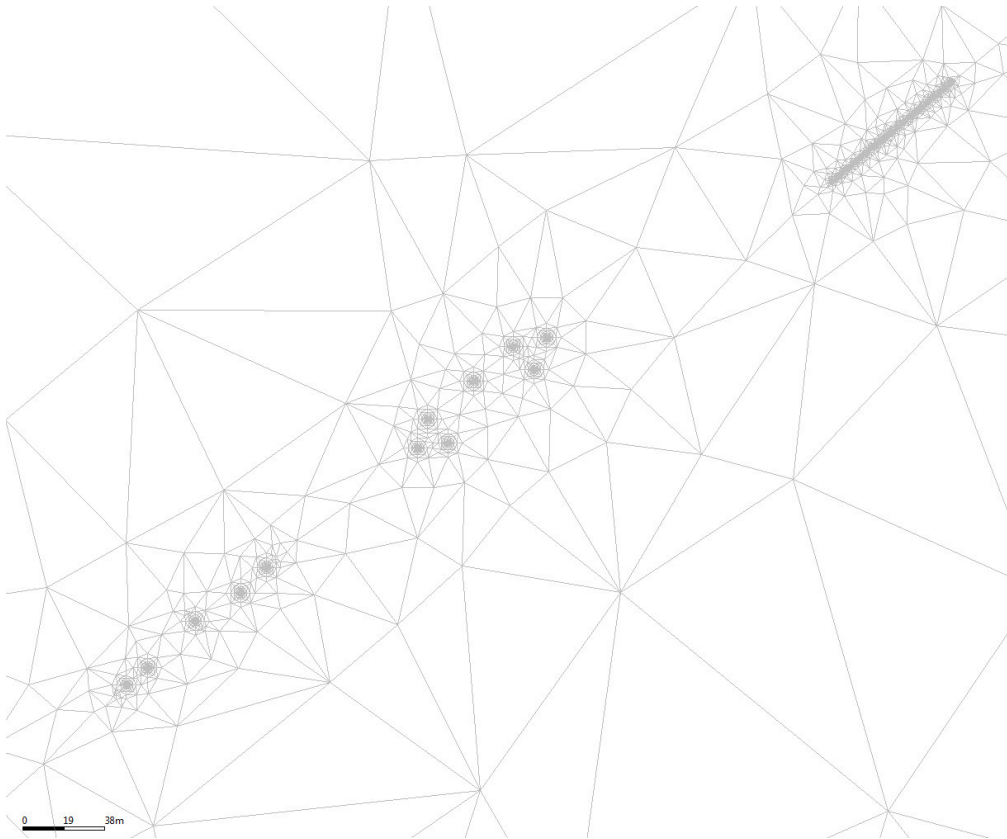


Abbildung D-16: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Bereich Organe 2–4

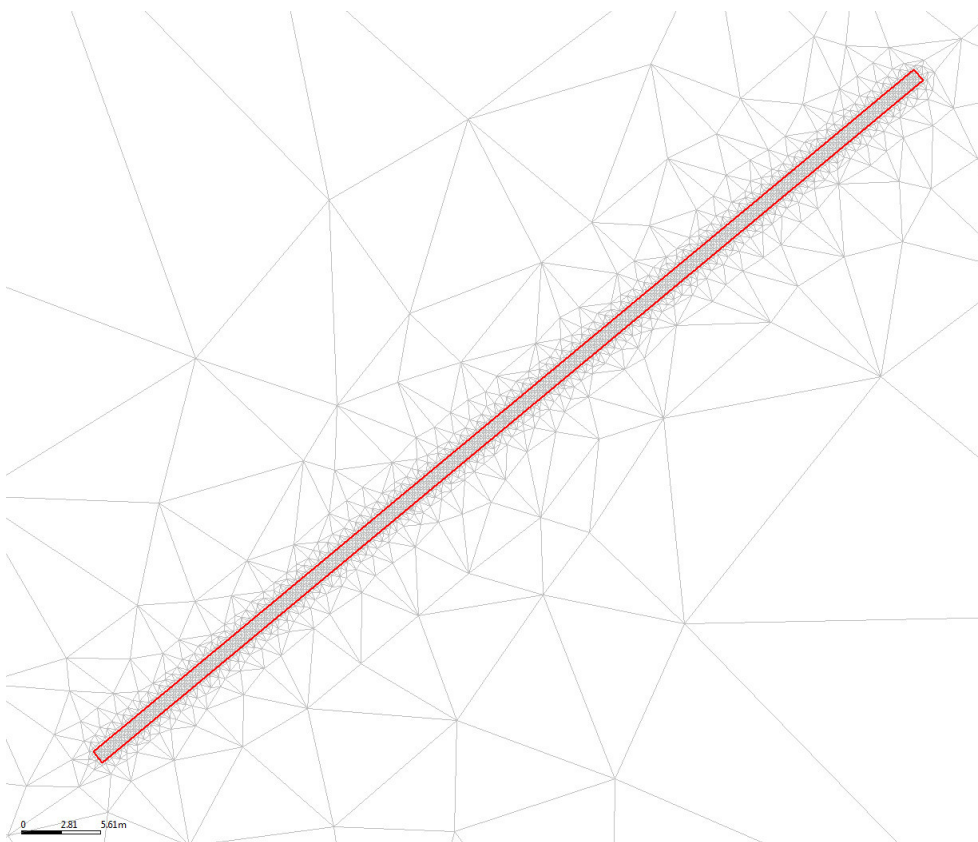


Abbildung D-17: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Organ 2

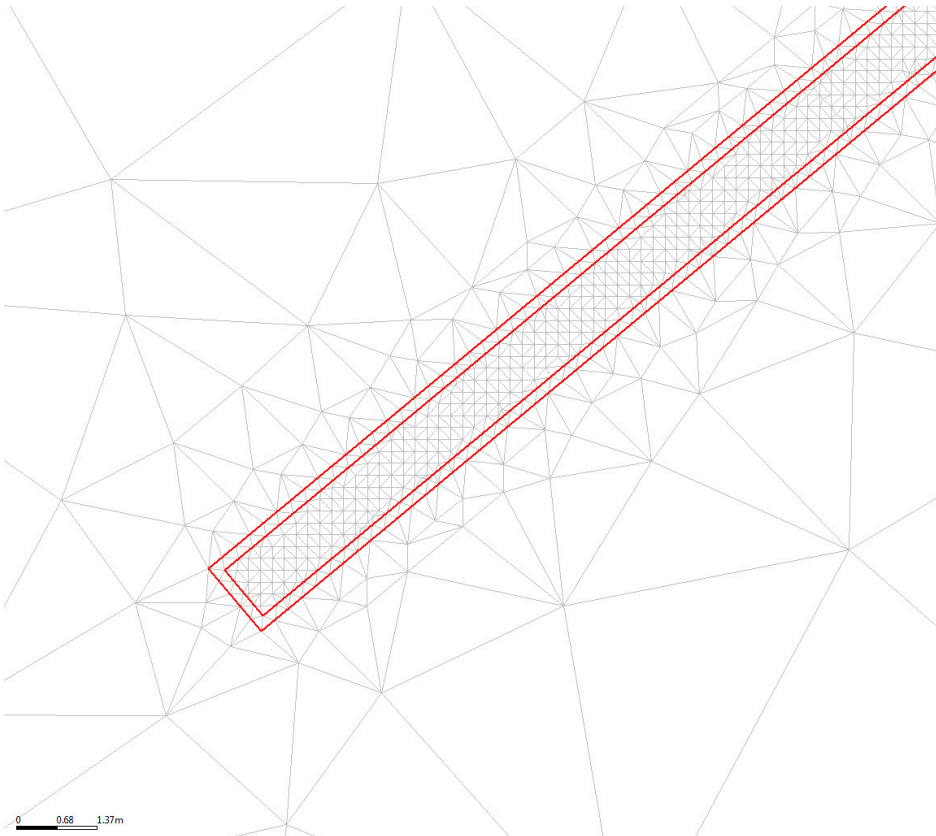


Abbildung D-18: Grundnetz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Nahbereich Organ 2

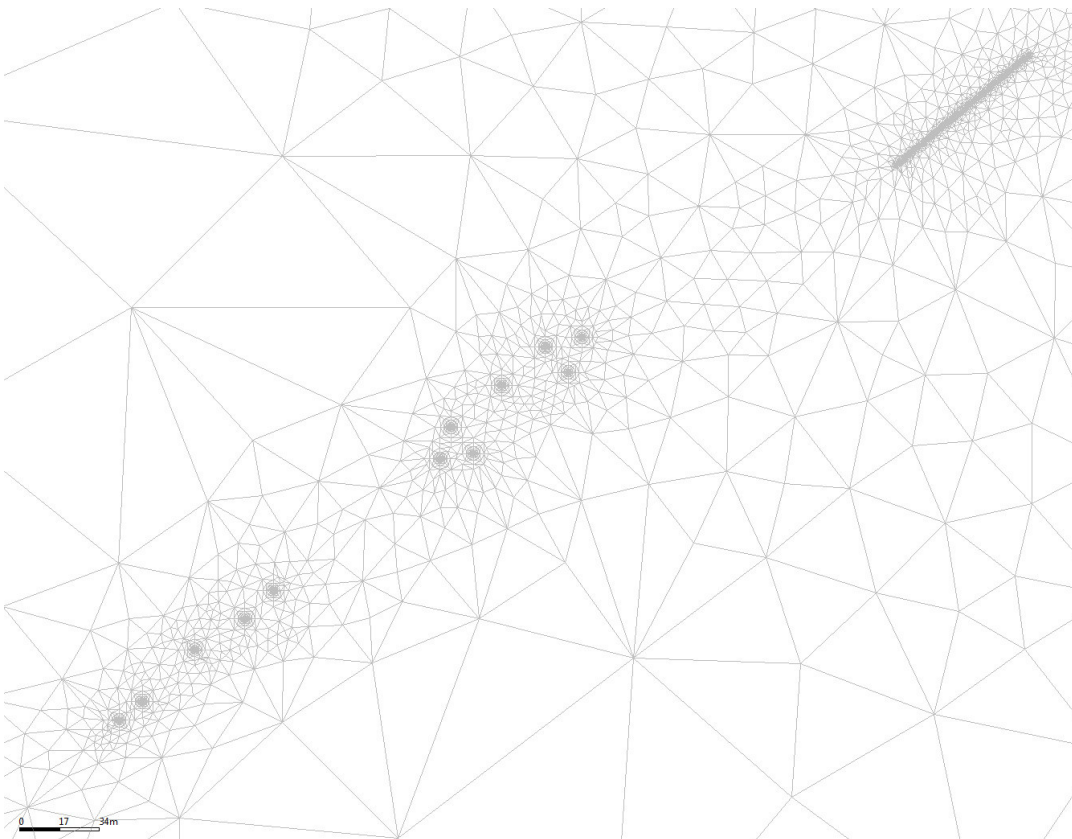


Abbildung D-19: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Bereich Organe 2 – 4

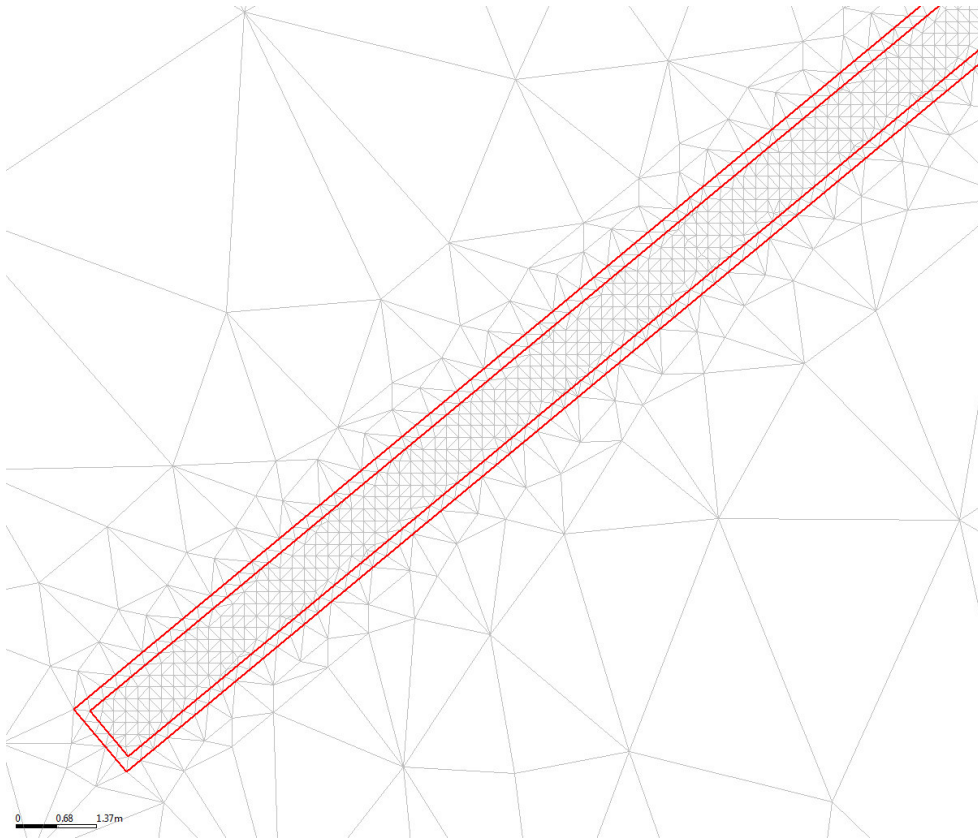


Abbildung D-20: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Nahbereich des Sickerschlitzgrabens

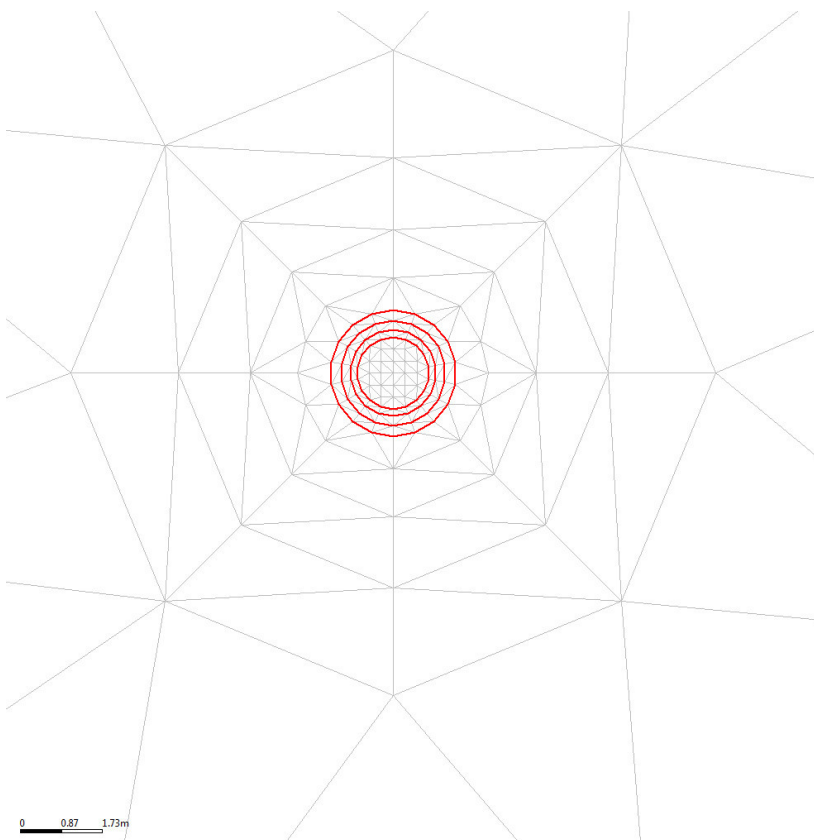


Abbildung D-21: Verfeinertes Netz für das Modellgebiet Gernsheimer Wald; Nahbereich eines Kiesbohrlochs am Organ 1

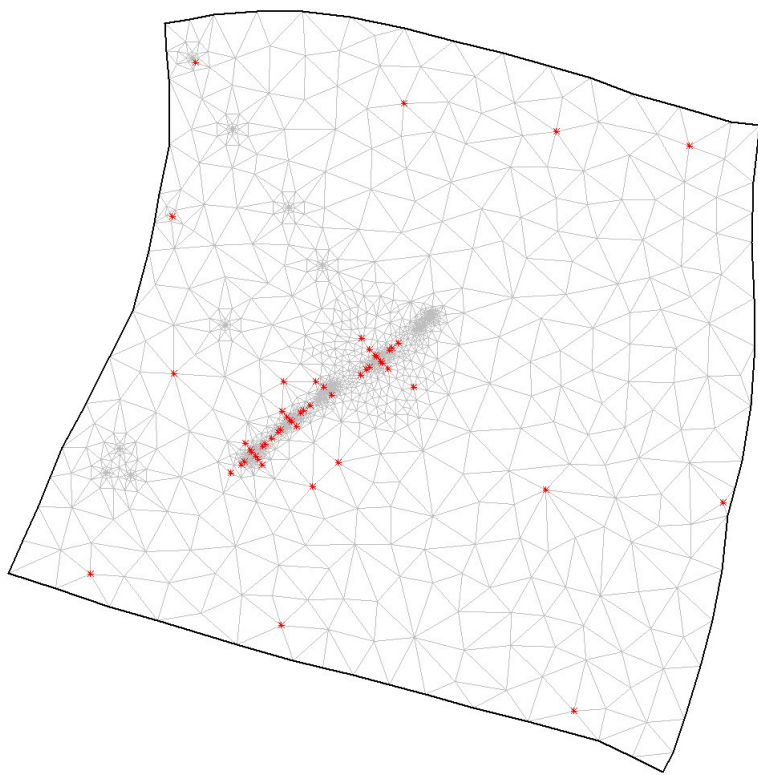


Abbildung D-22: Im Modellgebiet des Gernsheimer Waldes enthaltene Grundwassermessstellen

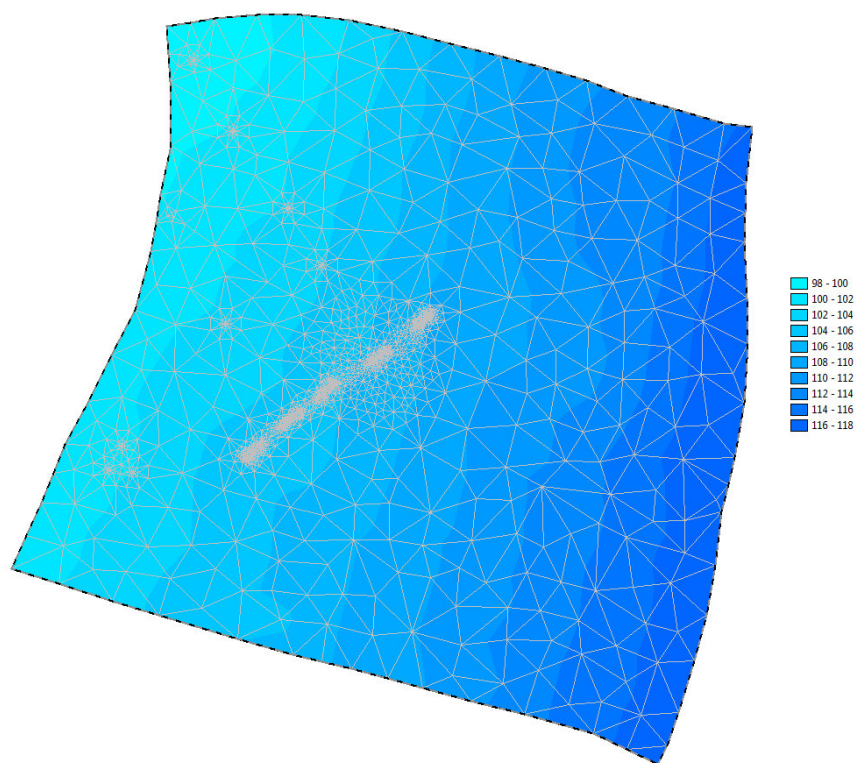


Abbildung D-23: Mächtigkeit des Grundwasserleiters im Modellgebiet Gernsheimer Wald (Angabe in m)



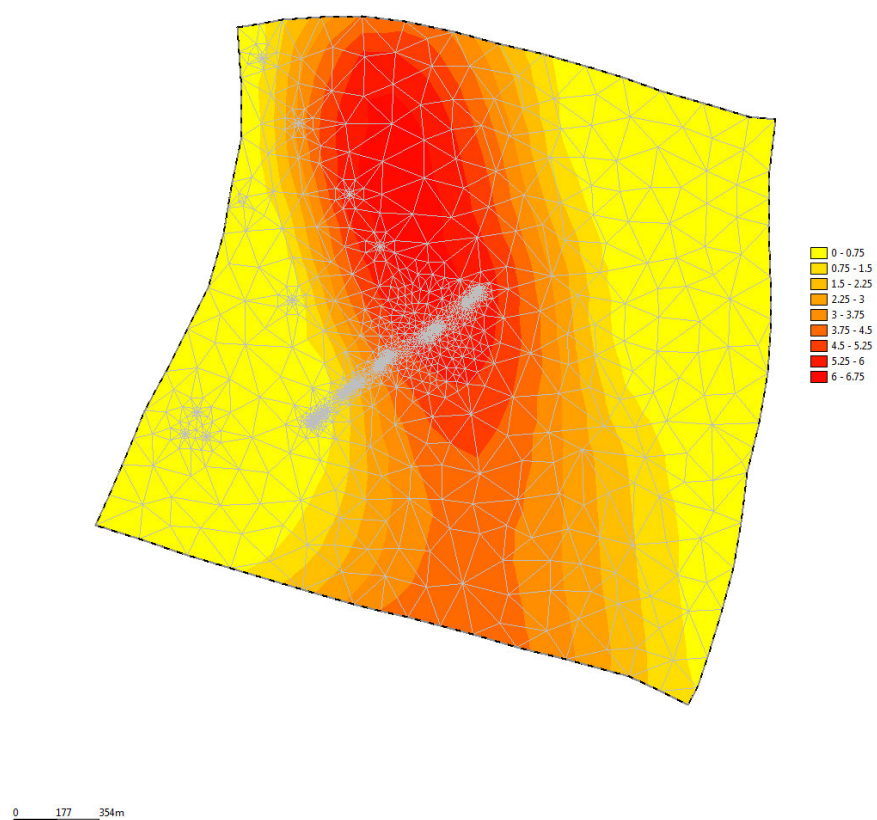


Abbildung D-24: Mächtigkeit der oberen Tonschicht im Modellgebiet des Gernsheimer Waldes (Angabe in m)

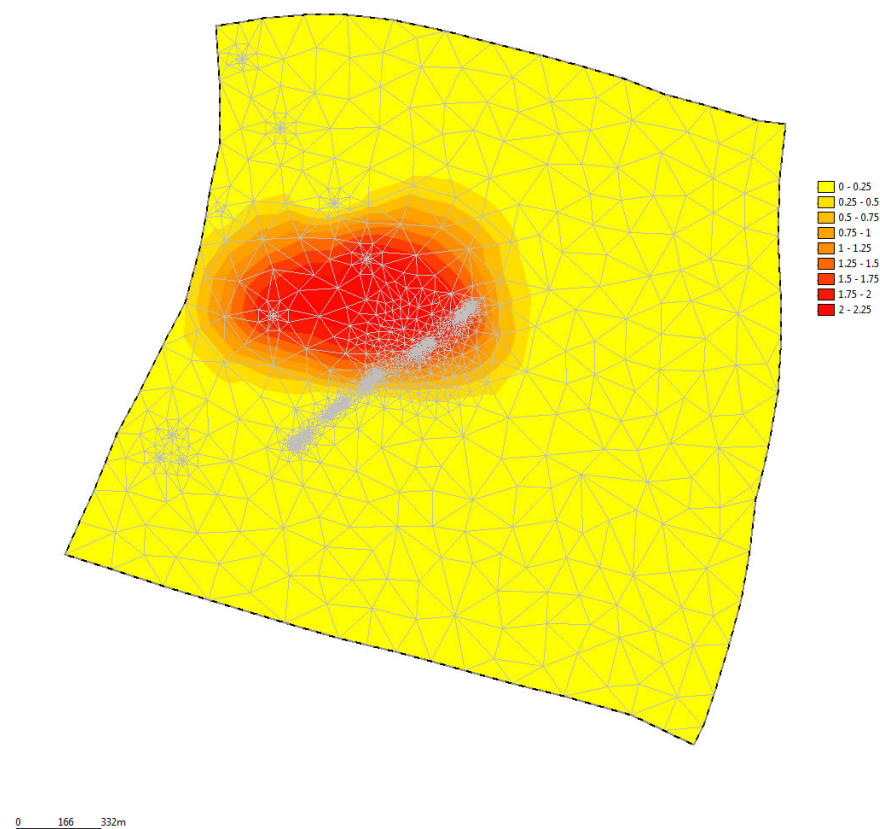


Abbildung D-25: Mächtigkeit der unteren Tonschicht im Modellgebiet des Gernsheimer Waldes (Angabe in m)

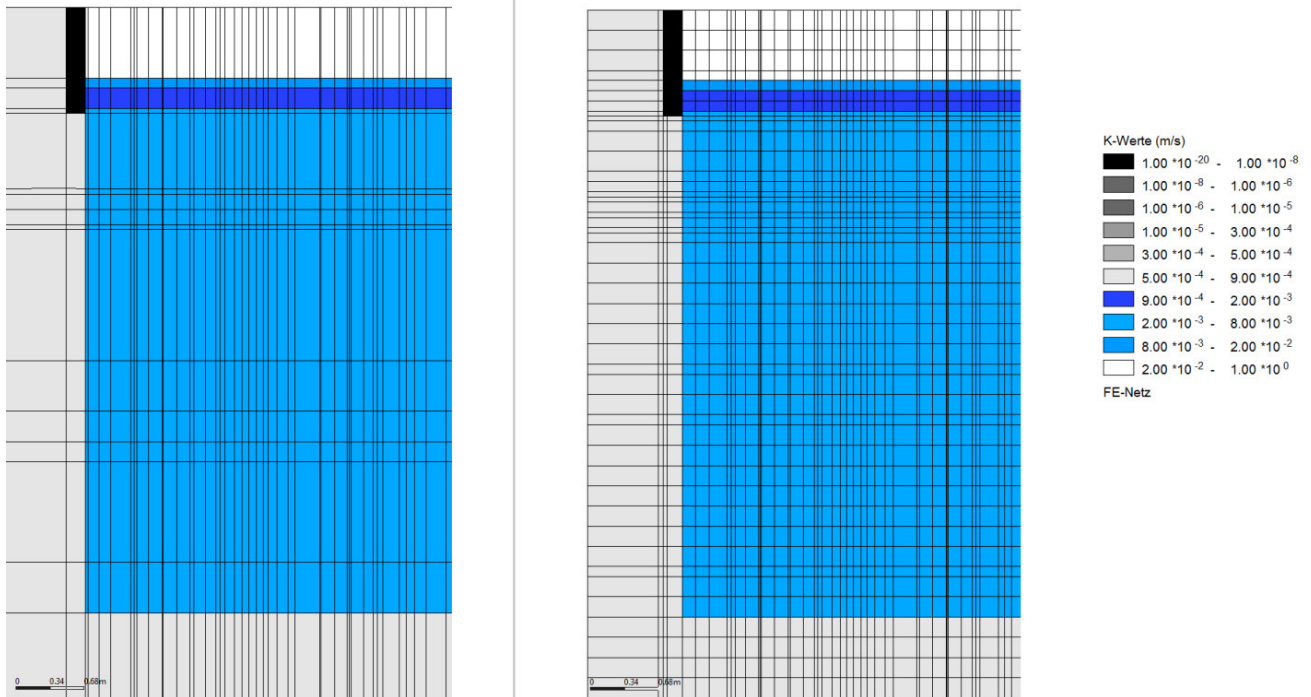


Abbildung D-26: Darstellung der Elementschichten im Nahbereich des Sickerschlitzgrabens durch die Zwangspunkte (links) und die finale Schichteinteilung (rechts)

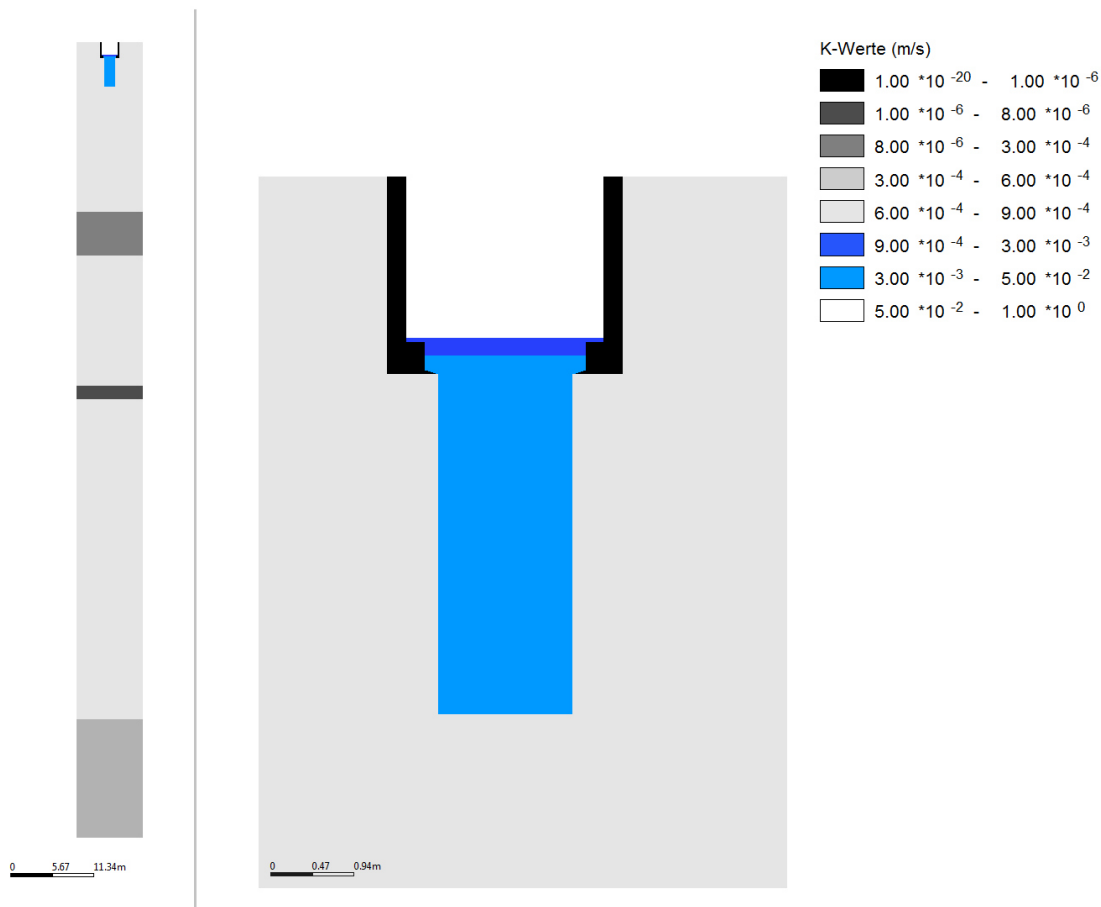


Abbildung D-27: Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich des Bohrlochs D des Organs 1

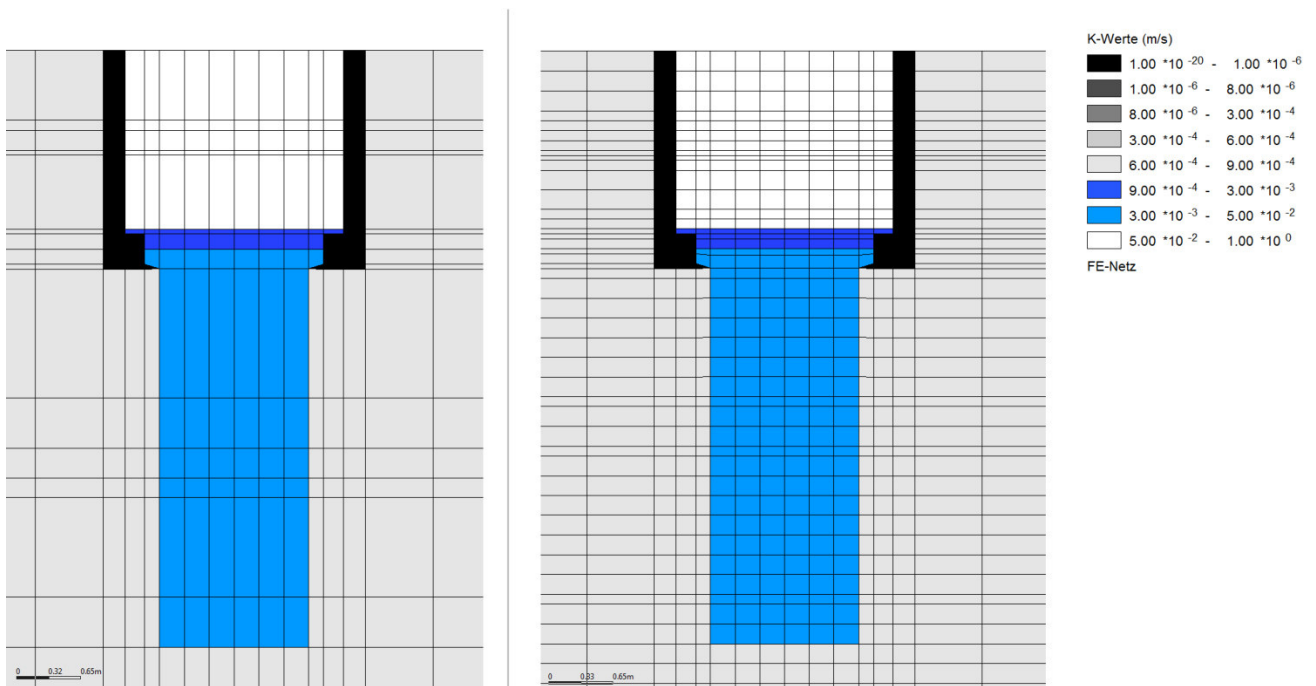


Abbildung D-28: Darstellung der Elementschichten im Nahbereich des Kiesbohrlochs D des Organs 1 durch die Zwangspunkte (links) und die finale Schichteinteilung (rechts)

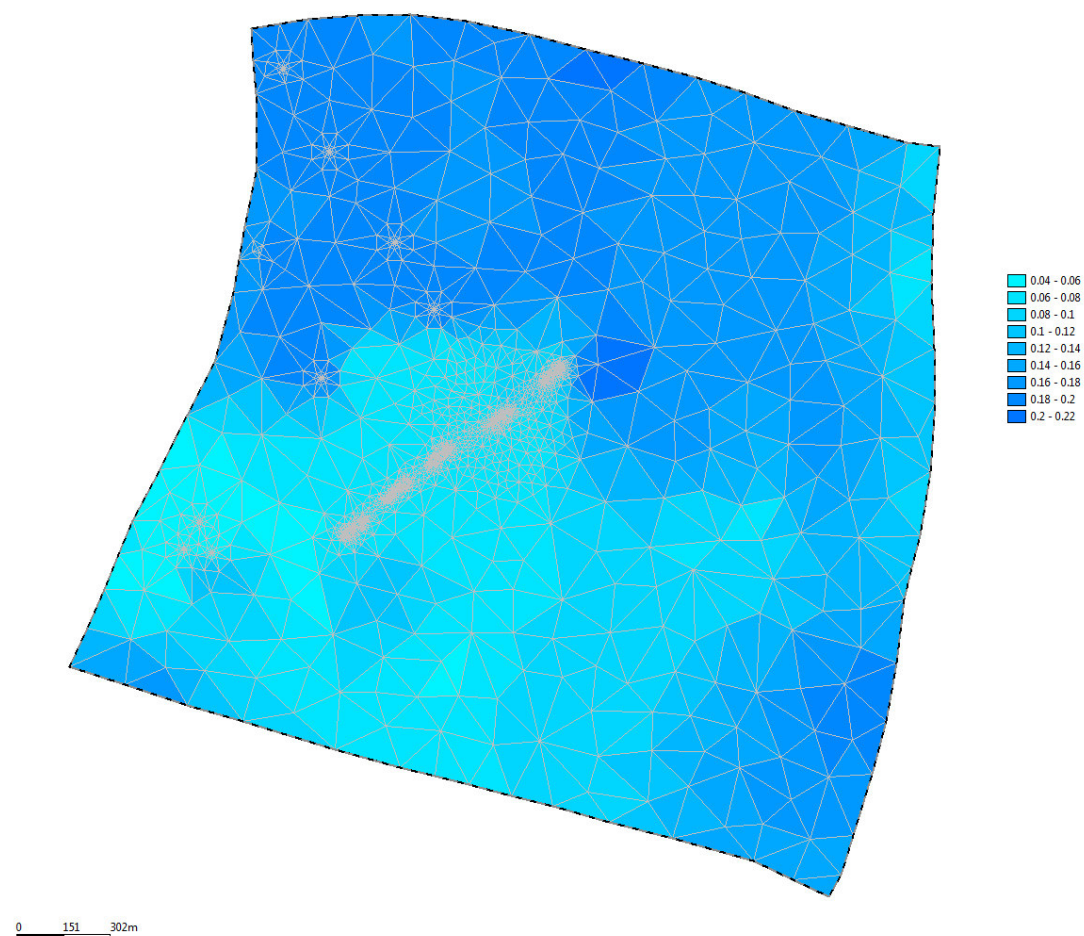


Abbildung D-29: Grundwasserneubildung im Modellgebiet Gernsheimer Wald (Angabe in m³/(m²·a))

## Anlage E: Tabellen der Datenaufbereitung

### E.2: Modell Kiesbohrlöcher

Tabelle E-1: Übersicht der Infiltrationsorgane des Standorts Jägersburger Wald

Infiltrationsorgan	Gemarkung	Infiltrationsbeginn
Organ 1	Groß-Rohrheim	Oktober 1998
Organ 2	Groß-Rohrheim	Oktober 1998
Organ 3	Groß-Rohrheim	Oktober 1998
Organ 4	Groß-Rohrheim	Oktober 1998
Organ 5	Groß-Hausen	Oktober 1998
Organ 6	Groß-Hausen	Oktober 1998
Organ 7	Groß-Hausen	November 1998
Organ 8	Groß-Hausen	November 1998
Organ 9	Groß-Hausen	November 1998
Organ 10	Groß-Hausen	Januar 1999
Organ 11	Groß-Hausen	Februar 2000
Organ 12	Groß-Hausen	Januar 1999
Waldgraben Groß-Rohrheim	Groß-Rohrheim	Juli 1996
Grenzgraben Biblis	Groß-Hausen	Dezember 1997



Tabelle E-2: Zur Verfügung stehende Datensätze für das Infiltrationsorgan 6 im Jägersburger Wald

Jahr	Kiesbohrloch	Infiltrationsmengen	Messung Überstau	Messung in mittleren RFL
2014	A	08.05.14 - 18.06.14	05.03.14 - 31.12.14	-
	B	08.05.14 - 18.06.14	05.03.14 - 31.12.14	-
	C	08.05.14 - 18.06.14	05.03.14 - 31.12.14	-
	D	08.05.14 - 18.06.14	07.03.14 - 31.12.14	-
	E	08.05.14 - 18.06.14	05.03.14 - 31.12.14	-
2015	A	01.01.15 - 06.10.15	01.01.15 - 23.01.15 01.04.15 - 31.12.15	06.10.15 - 31.12.15
	B	01.01.15 - 06.10.15	01.01.15 - 23.01.15 01.04.15 - 31.12.15	06.10.15 - 31.12.15
	C	01.01.15 - 06.10.15	01.04.15 - 31.12.15	-
	D	01.01.15 - 06.10.15	01.01.15 - 23.01.15 01.04.15 - 31.12.15	06.10.15 - 31.12.15
	E	01.01.15 - 06.10.15	01.01.15 - 23.01.15 01.04.15 - 31.12.15	-
2016	A	01.01.16 - 31.12.16	-	01.01.16 - 31.12.16
	B	01.01.16 - 31.12.16	-	01.01.16 - 31.12.16
	C	01.01.16 - 31.12.16	01.01.16 - 30.03.16 07.12.16 - 31.12.16	-
	D	01.01.16 - 31.12.16	-	01.01.16 - 31.12.16
	E	01.01.16 - 31.12.16	01.01.16 - 31.12.16	-
2017	A	01.01.17 - 31.12.17	-	-
	B	01.01.17 - 31.12.17	-	21.04.17 - 31.12.17
	C	01.01.17 - 31.12.17	-	-
	D	01.01.17 - 31.12.17	-	21.04.17 - 31.12.17
	E	01.01.17 - 31.12.17	-	21.04.17 - 31.12.17
2018	A	01.01.18 - 18.04.18	-	-
	B	01.01.18 - 18.04.18	-	01.01.18 - 21.02.18
	C	01.01.18 - 18.04.18	-	-
	D	01.01.18 - 18.04.18	-	01.01.18 - 21.02.18
	E	01.01.18 - 18.04.18	-	01.01.18 - 21.02.18

Tabelle E-3: Bestimmung der Lage der Zwangsschichten (Bezugspunkt: Bohrloch A des Organs 6)

Knotenschicht	Zwangspunkt	Höhe	Mächtigkeit zu erzeugende Schicht	Mächtigkeit bestehende Schicht	Verhältnis
	[-]	[müNN]	[m]	[m]	[-]
ZKOR1/GELA	Geländeoberkante	91,44	1,80	116,83	64,90
ZKOR2	Filtersand	89,64	0,05	115,03	2300,52
ZKOR3	Einengung 1	89,59	0,15	114,98	766,51
ZKOR4	Filterkies	89,44	0,15	114,83	765,51
ZKOR5	Einengung 2.1	89,29	0,05	114,68	2293,52
ZKOR6	Einengung 2.2	89,24	2,05	114,63	55,92
ZKOR7	Rammfilterlanze 1	87,19	2,50	112,58	45,03
ZKOR8	Rammfilterlanze 2	84,69	2,00	110,08	55,04
ZKOR9	Rammfilterlanze 3	82,69	0,25	108,08	432,30
ZKOR10	Endteufe	82,44	14,35	107,83	7,52
ZKOR11	Beginn oberer Ton	68,09	0,00	93,48	-
ZKOR12	Ende oberer Ton	68,09	17,62	93,48	5,31
ZKOR13	Beginn unterer Ton	50,47	0,88	75,86	86,20
ZKOR14	Ende unterer Ton	49,59	74,98	74,98	1,00
ZKOR15	Unterkante Modell	-25,39	-	-	-

Zu Beginn der Schichteneinteilung ist nur eine Elementschicht vorhanden, welche sich von der Geländeoberkante bis hin zur Unterkante des Modells erstreckt. Das bedeutet, dass anfangs nur zwei Knotenschichten ZKOR1/GELA und ZKOR2 (in der oben stehenden Tabelle ZKOR15) und die dazwischen liegende Elementschicht vorhanden sind. Erst durch die Teilung dieser ersten Elementschicht werden Schritt für Schritt die in der Tabelle aufgelisteten Knotenschichten erstellt. Beispielhaft wird anschließend die Berechnung für das Teilungsverhältnis zur Erzeugung der Knotenschicht für die Oberkante des Filtersandes der Infiltrationsorgane aufgezeigt.

Die zu erzeugende neue Elementschicht erstreckt sich von der Knotenschicht mit den Attributwerten ZKOR1/GELA bis zu der zu erzeugenden Knotenschicht mit den Attributwerten ZKOR2. Aus diesen Werten ergibt sich die Mächtigkeit der neuen Schicht:

$$91,44 \text{ m} - 89,64 \text{ m} = 1,80 \text{ m}$$

Die Mächtigkeit der bestehenden Schicht wird aus dem jeweiligen ZKOR-Attributwert (hier ZKOR1/GELA) und dem Wert für die Unterkante des Modells berechnet:

$$91,44 \text{ m} - (-25,39 \text{ m}) = 116,83 \text{ m}$$

Das Verhältnis der bestehenden Schicht zu der zu erzeugenden Schicht ergibt sich wie folgt:

$$\frac{116,83 \text{ m}}{1,80 \text{ m}} = 64,90$$

Die bestehende Elementschicht 1 wird demnach in zwei Schichten aufgeteilt mit dem Teilungsverhältnis 1 zu 64. Die Erzeugung der weiteren Knoten- und Elementschichten erfolgt gleichermaßen. Nach Abschließung der Schichteinteilung aufgrund der Zwangspunkte sind nun insgesamt 15 Knotenschichten und 14 Elementschichten im Modell vorhanden.

Tabelle E-4: Bestimmung der Mächtigkeit und Anzahl der zusätzlichen Schichten (Bezugspunkt: Bohrloch A des Organs 6)

Knotenschicht	Zwangspunkt	Höhe	Mächtigkeit Zwangsschicht	Neue Mächtigkeit	Anzahl Schichten
	[-]	[müNN]	[m]	[m]	[-]
ZKOR1/GELA	Geländeoberkante	91,44	1,80	0,20	1
ZKOR2-ZKOR8	-	91,24 - 90,04	-	0,20	7
ZKOR9-ZKOR10	-	89,84 - 89,74	-	0,10	2
ZKOR11	Filtersand	89,64	0,05	0,05	1
ZKOR12	Einengung 1	89,59	0,15	0,05	1
ZKOR13	-	89,54	-	0,10	1
ZKOR14	Filterkies	89,44	0,15	0,10	1
ZKOR15	-	89,34	-	0,05	1
ZKOR16	Einengung 2.1	89,29	0,05	0,05	1
ZKOR17	Einengung 2.2	89,24	2,05	0,10	1
ZKOR18	-	89,14	-	0,15	1
ZKOR19-ZKOR27	-	88,99 - 87,39	-	0,20	9
ZKOR28	Rammfilterlanze 1	87,19	2,50	0,20	1
ZKOR29-ZKOR39	-	86,99 - 84,99	-	0,20	11
ZKOR40	-	84,79	-	0,10	1
ZKOR41	Rammfilterlanze 2	84,69	2,00	0,20	1
ZKOR42-ZKOR50	-	84,49 - 82,89	-	0,20	9
ZKOR51	Rammfilterlanze 3	82,69	0,25	0,25	1
ZKOR52	Endteufe	82,44	14,35	0,20	1
ZKOR53-ZKOR56	-	82,24 - 81,64	-	0,20	4
ZKOR57-ZKOR58	-	81,44 - 81,04	-	0,40	2
ZKOR59-ZKOR60	-	80,64 - 79,84	-	0,80	2
ZKOR61-ZKOR62	-	79,03 - 77,43	-	1,60	2
ZKOR63-ZKOR64	-	75,83 - 71,96	-	3,87	2
ZKOR65	Beginn oberer Ton	68,09	0,00		1
ZKOR66	Ende oberer Ton	68,09	17,62	4,41	1
ZKOR67-ZKOR69	-	63,68 - 54,87	-	4,41	3
ZKOR70	Ende oberer Ton	50,47	0,88	0,88	1
ZKOR71	Beginn unterer Ton	49,59	74,98	5,00	1
ZKOR72	-	44,59	-	10,00	1
ZKOR73-ZKOR75	-	34,60 - 5,39	-	19,99	3
ZKOR76	Unterkante Modell	-25,39	-	-	-

Tabelle E-5: Minimale, maximale und mittlere Infiltrationsmengen der zur Verfügung stehenden Datensätze des Organs 6 im Jägersburger Wald

Jahr	Kiesbohrloch	min. Infiltrationsmenge	max. Infiltrationsmenge	mittl. Infiltrationsmenge
	[-]	[m³/h]	[m³/h]	[m³/h]
2014	A	0,0	9,7	8,8
	B	0,0	10,6	9,5
	C	0,0	11,4	10,6
	D	0,0	11,6	10,6
	E	0,0	8,9	8,1
2015	A	0,0	11,9	9,5
	B	0,0	12,6	10,0
	C	0,0	16,0	11,9
	D	0,0	14,1	11,0
	E	0,0	12,7	9,9
2016	A	0,0	13,2	7,6
	B	0,0	12,3	6,7
	C	0,0	14,8	8,6
	D	0,0	15,6	9,1
	E	0,0	13,7	8,0
2017	A	0,0	13,9	7,0
	B	0,0	13,6	7,3
	C	0,0	16,3	7,8
	D	0,0	12,6	5,9
	E	0,0	13,6	6,6
2018	A	0,0	8,6	1,6
	B	0,0	10,6	1,9
	C	0,0	11,9	2,1
	D	0,0	12,9	1,8
	E	0,0	11,0	1,8



## E.2: Modell Sickerschlitzengraben

Tabelle E-6: Übersicht der Infiltrationsorgane des Standorts Gernsheimer Wald

Infiltrationsorgan	Gemarkung	Infiltrationsbeginn
Organ 1	Gernsheim	August 1996
Organ 2	Gernsheim	Januar 1994
Organ 3	Gernsheim	August 1996
Organ 4	Gernsheim	Januar 1994
Organ 5	Gernsheim	Januar 1996
Organ 6	Gernsheim	März 1996
Organ 7	Gernsheim	März 1996
Organ 8	Gernsheim	März 1996
Organ 9	Gernsheim	März 1996
Organ 10	Gernsheim	August 1996
Organ 11	Gernsheim	August 1996
Organ 12	Gernsheim	August 1996
Organ 13	Gernsheim	September 1996
Organ 14	Gernsheim	September 1996
Organ 15	Gernsheim	September 1996
Organ 16	Gernsheim	September 1996
Organ 17	Gernsheim	September 1996
Organ 18	Gernsheim	September 1996
Landgraben	Hahn	Juli 1993
Rotgraben	Pfungstadt	März 1993
Kohlbruchgraben	Allmendfeld	Juli 1993
Waldseitengraben	Gernsheim	Juli 1993

Tabelle E-7: Bestimmung der Lage der Zwangsschichten (Bezugspunkt: Knoten 5156 im SSG)

Knotenschicht	Zwangspunkt	Höhe	Mächtigkeit zu erzeugende Schicht	Mächtigkeit bestehende Schicht	Verhältnis
	[-]	[müNN]	[m]	[m]	[-]
ZKOR1	Geländeoberkante	91,25	0,70	106,21	151,73
ZKOR2	Filterkies SSG 1	90,55	0,10	105,51	1055,10
ZKOR3	Filtersand SSG	90,45	0,20	105,41	527,05
ZKOR4	Filterkies SSG 2	90,25	0,05	105,21	2104,20
ZKOR5	Ende SSG Wand	90,20	0,75	105,16	140,21
ZKOR6	Filtersand KBL	89,45	0,05	104,41	2088,20
ZKOR7	Einengung 1	89,40	0,15	104,36	695,73
ZKOR8	Filterkies KBL	89,25	0,15	104,21	694,73
ZKOR9	Einengung 2.1	89,10	0,05	104,06	2081,20
ZKOR10	Einengung 2.2	89,05	1,30	104,01	80,01
ZKOR11	Rammfilterlanze 1	87,75	0,50	102,71	205,42
ZKOR12	Rammfilterlanze 1.4	87,25	0,30	102,21	342,41
ZKOR13	Rammfilterlanze A1 B1 C1	86,95	0,20	101,91	505,76
ZKOR14	Rammfilterlanze 2	86,75	1,00	101,71	101,71
ZKOR15	Rammfilterlanze 3	85,75	0,50	100,71	201,42
ZKOR16	Endteufe + RFL SSG + RFL 2.4	85,25	2,00	100,21	50,11
ZKOR17	Rammfilterlanze 3.4	83,25	1,00	98,21	98,21
ZKOR18	Endteufe Organ 4	82,25	14,32	97,21	6,79
ZKOR19	Beginn oberer Ton	67,93	5,78	82,89	14,34
ZKOR20	Ende oberer Ton	62,15	17,15	77,11	4,50
ZKOR21	Beginn unterer Ton	45,00	1,76	59,96	34,07
ZKOR22	Ende unterer Ton	43,24	42,70	58,20	1,36
ZKOR23	KWER Änderung	0,54	15,50	15,50	1,00
ZKOR24	Unterkante Modell	-14,96	-	-	-

Dadurch, dass im Modellbereich des Gernsheimer Waldes ein Sickerschlitgrabens und Kiesbohrlöcher sind, wobei das die Bohrlöcher des Infiltrationsorgans 4 eine größere Endteufe aufweitet als die anderen Kiesbohrlöcher, ergeben sich bei diesem Modell mehr Zwangspunkte als bei dem Modell des Kiesbohrlochs im Jägersburger Wald. Die Einengungen des Querschnitts beziehen sich auf die Kiesbohrlöcher (KBL). Die Rammfilterlanzen (RFL) des Sickerschlitgrabens (SSG) haben die Bezeichnung A1, A2, B1, B2, C1 und C2, wobei die an der Sohle des Grabens liegenden mit der Knotenschicht ZKOR16 berücksichtigt werden. Aufgrund der größeren Endteufe des Organs 4 liegen seine Rammfilterlanzen (1.4, 2.4 und 3.4) auf anderen Höhen als die der anderen Kiesbohrlöcher (1, 2, und 3). Der Sickerschlitgrabens sowie die Organe 1, 3 und 5 haben die gleiche Endteufe, die mit ZKOR16 in das Modell implementiert wird. Aus dem großräumigen Modell von BGS UMWELT für das Hessische Ried der BGS UMWELT geht hervor, dass im Bereich des Modells für den Sickerschlitgrabens ab einer Tiefe von etwa 90,5 m der Grundwasserkörper eine etwas geringere Durchlässigkeit aufweist. Die Höhenlage dieser Änderung (KWER Änderung) wird aus dem großräumigen Modell importiert. Die Berechnung für das Teilungsverhältnis zur Erzeugung der verschiedenen Knotenschichten erfolgt dabei wie für das Modell des Jägersburger Waldes.

Tabelle E-8: Bestimmung der Mächtigkeit und Anzahl der zusätzlichen Schichten (Bezugspunkt: Knoten 5156 im SSG)

Knotenschicht	Zwangspunkt	Höhe	Mächtigkeit Zwangsschicht	Neue Mächtigkeit	Anzahl Schichten
	[-]	[müNN]	[m]	[m]	[-]
ZKOR1	Geländeoberkante	91,25	0,70	0,20	1
ZKOR2-ZKOR3	-	91,05 - 91,85	-	0,20	2
ZKOR4	-	91,65	-	0,10	1
ZKOR5	Filterkies SSG 1	90,55	0,10	0,10	1
ZKOR6	Filtersand SSG	90,45	0,20	0,10	1
ZKOR7	-	90,35	-	0,10	1
ZKOR8	Filterkies SSG 2	90,25	0,05	0,05	1
ZKOR9	Ende SSG Wand	90,20	0,75	0,05	1
ZKOR10	-	90,15	-	0,10	1
ZKOR11-ZKOR12	-	90,05 - 89,85	-	0,20	2
ZKOR13-ZKOR14	-	89,65 - 89,55	-	0,10	2
ZKOR15	Filtersand KBL	89,45	0,05	0,05	1
ZKOR16	Einengung 1	89,40	0,15	0,05	1
ZKOR17	-	89,35	-	0,10	1
ZKOR18	Filterkies KBL	89,25	0,15	0,05	1
ZKOR19	-	89,20	-	0,10	1
ZKOR20	Einengung 2.1	89,10	0,05	0,05	1
ZKOR21	Einengung 2.2	89,05	1,30	0,10	1
ZKOR22-ZKOR27	-	88,95 - 87,95	-	0,20	6
ZKOR28	Rammfilterlanze 1	87,75	0,50	0,10	1
ZKOR29-ZKOR30	-	87,65 - 87,45	-	0,20	2
ZKOR31	Rammfilterlanze 1.4	87,25	0,30	0,10	1
ZKOR32	-	87,15	-	0,20	1
ZKOR33	Rammfilterlanze A1 B1 C1	86,95	0,20	0,20	1
ZKOR34	Rammfilterlanze 2	86,75	1,00	0,20	1
ZKOR35-ZKOR38	-	86,55 - 85,95	-	0,20	4
ZKOR39	Rammfilterlanze 3	85,75	0,50	0,10	1
ZKOR40-ZKOR41	-	85,65 - 85,45	-	0,20	2
ZKOR42	Endteufe+Pegel SSG 2+RFL2.4	85,25	2,00	0,20	1
ZKOR43-ZKOR51	-	85,05 - 83,45	-	0,20	9
ZKOR52	Rammfilterlanze 3.4	83,25	1,00	0,20	1
ZKOR53-ZKOR56	-	83,05 - 82,45	-	0,20	4
ZKOR57	Endteufe 4	82,25	14,32	0,20	1
ZKOR58	-	82,05	-	0,20	1
ZKOR59	-	81,85	-	0,40	1
ZKOR60	-	81,45	-	0,80	1
ZKOR61	-	80,65	-	1,60	1
ZKOR62-ZKOR65	-	79,05 - 70,71	-	2,78	4
ZKOR66	Beginn oberer Ton	67,93	5,78	5,78	1
ZKOR67	Ende oberer Ton	62,15	17,15	17,15	1
ZKOR68	Beginn unterer Ton	45,00	1,76	1,76	1
ZKOR69	Ende unterer Ton	43,24	42,70	10,00	1
ZKOR70-ZKOR72	-	33,24 - 11,44	-	10,90	3
ZKOR73	KWER Änderung	0,54	15,50	15,50	1
ZKOR74	Unterkante Modell	-14,96	-	-	-

Tabelle E-9: Fördermengen der Entnahmebrunnen im Modellgebiet Gernsheimer Wald

	Brunnennummer	Fördermenge	Fördermenge
	[-]	[m³/a]	[m³/h]
WW Allmend- feld	5	731.512	83,5
	6	747.304	85,3
	7	654.762	74,7
	8	861.578	98,4
	9	778.938	88,9
Stadt Gernsheim	I	545.846	62,3
	II	545.846	62,3
	III	-	-

## Anlage F: Diagrammauswahl der Datenaufbereitung

### F.1: Modell Kiesbohrlöcher

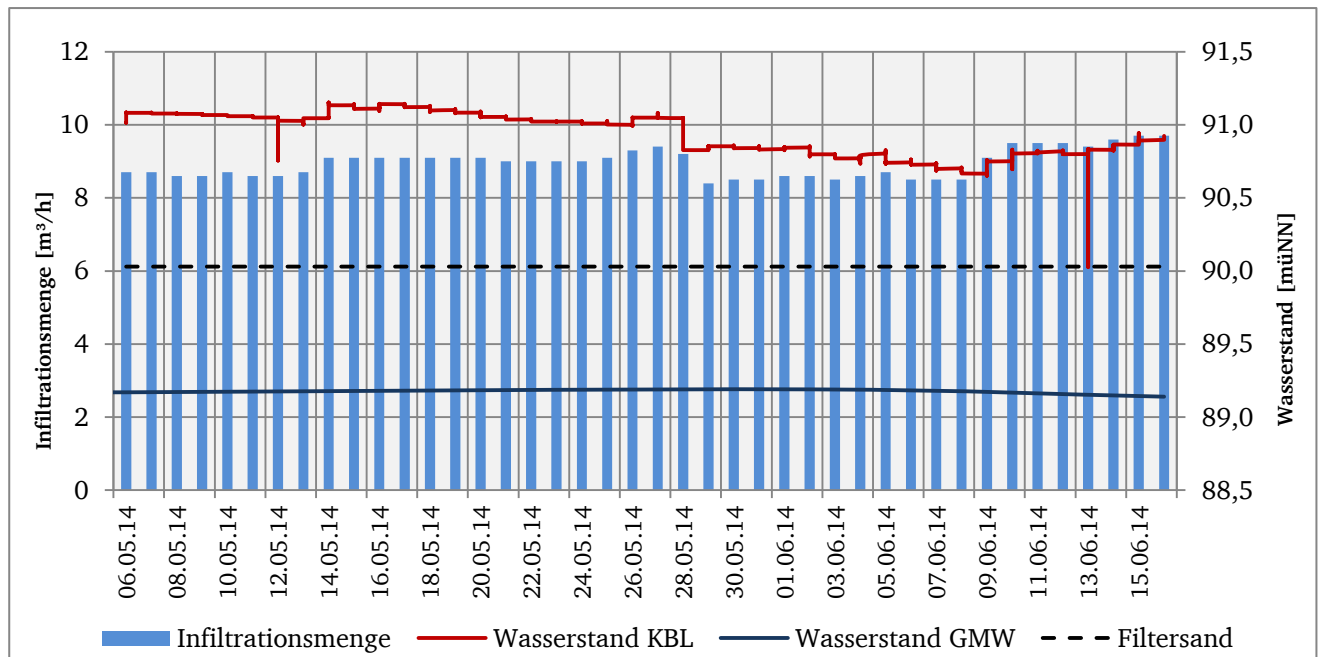


Abbildung F-1: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch A sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von Mai bis Juni 2014

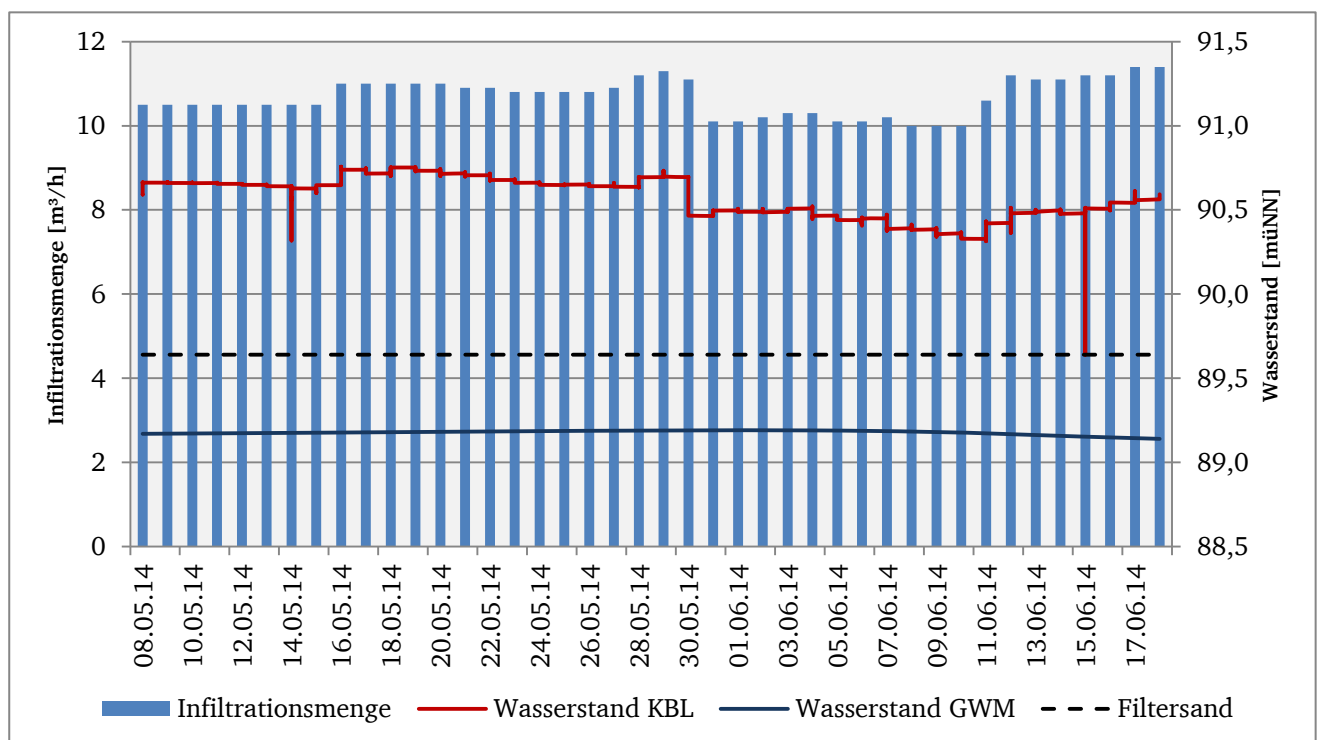


Abbildung F-2: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch C sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von Mai bis Juni 2014



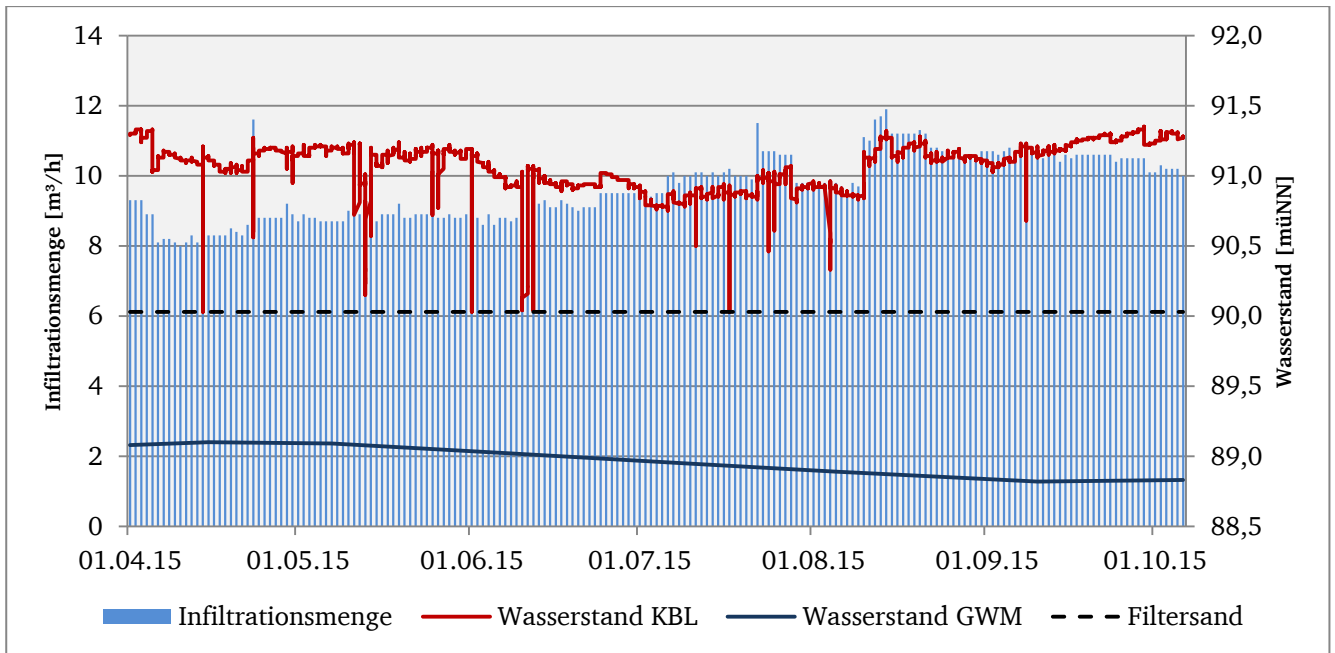


Abbildung F-3: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch A sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von April bis Oktober 2015

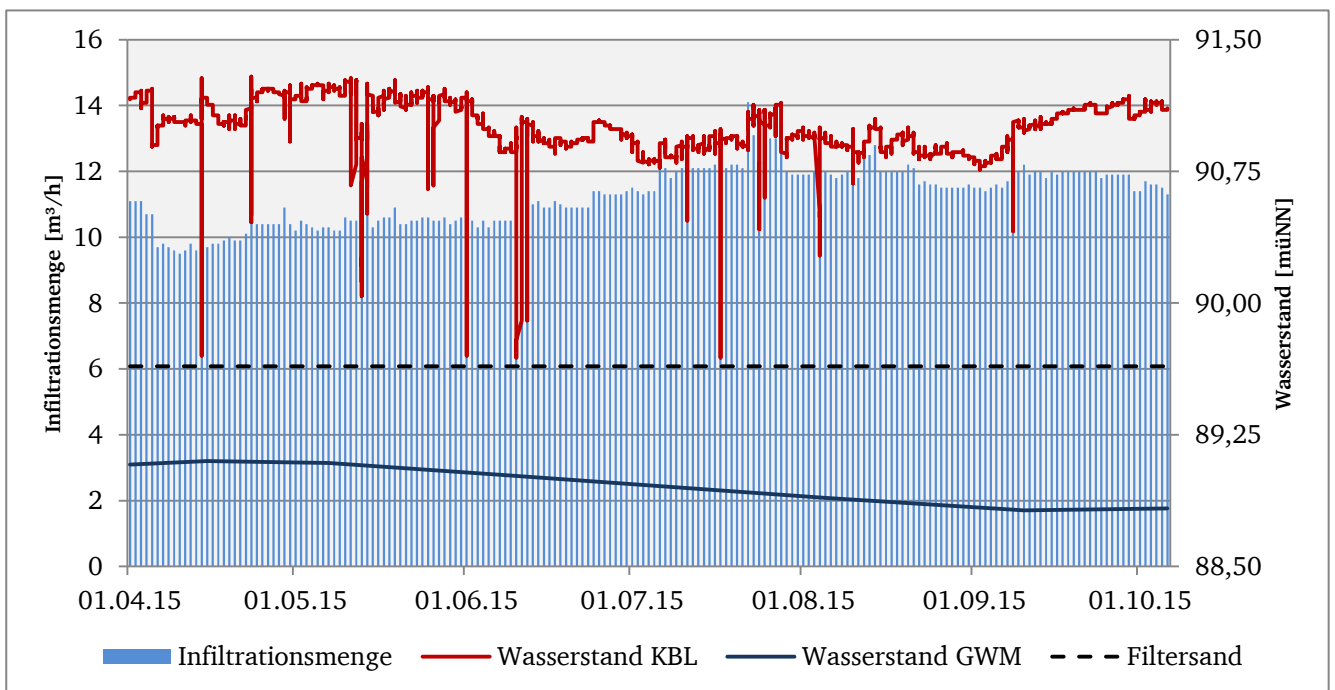


Abbildung F-4: Infiltrationsmenge und Wasserstand im Kiesbohrloch D sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 von April bis Oktober 2015

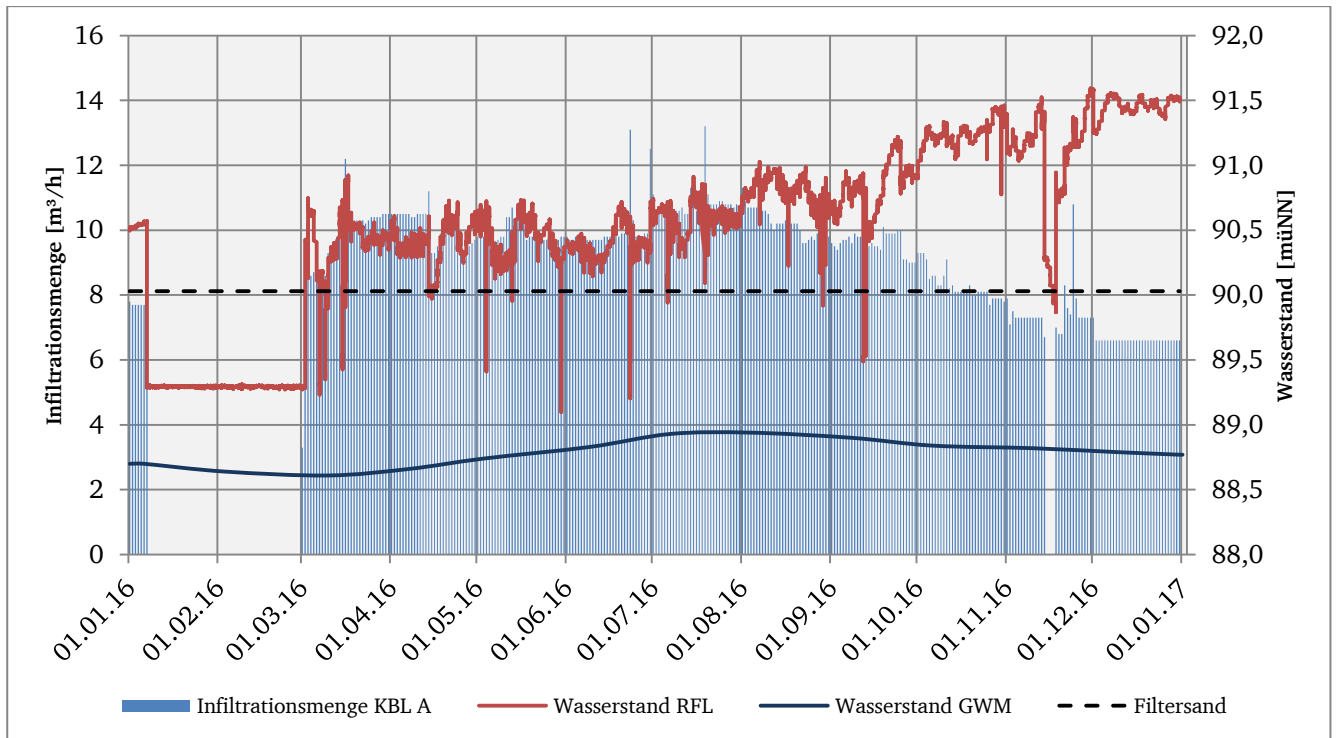


Abbildung F-5: Infiltrationsmenge und Wasserstand der mittleren Rammfilterlanze im Kiesbohrloch A sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 in 2016

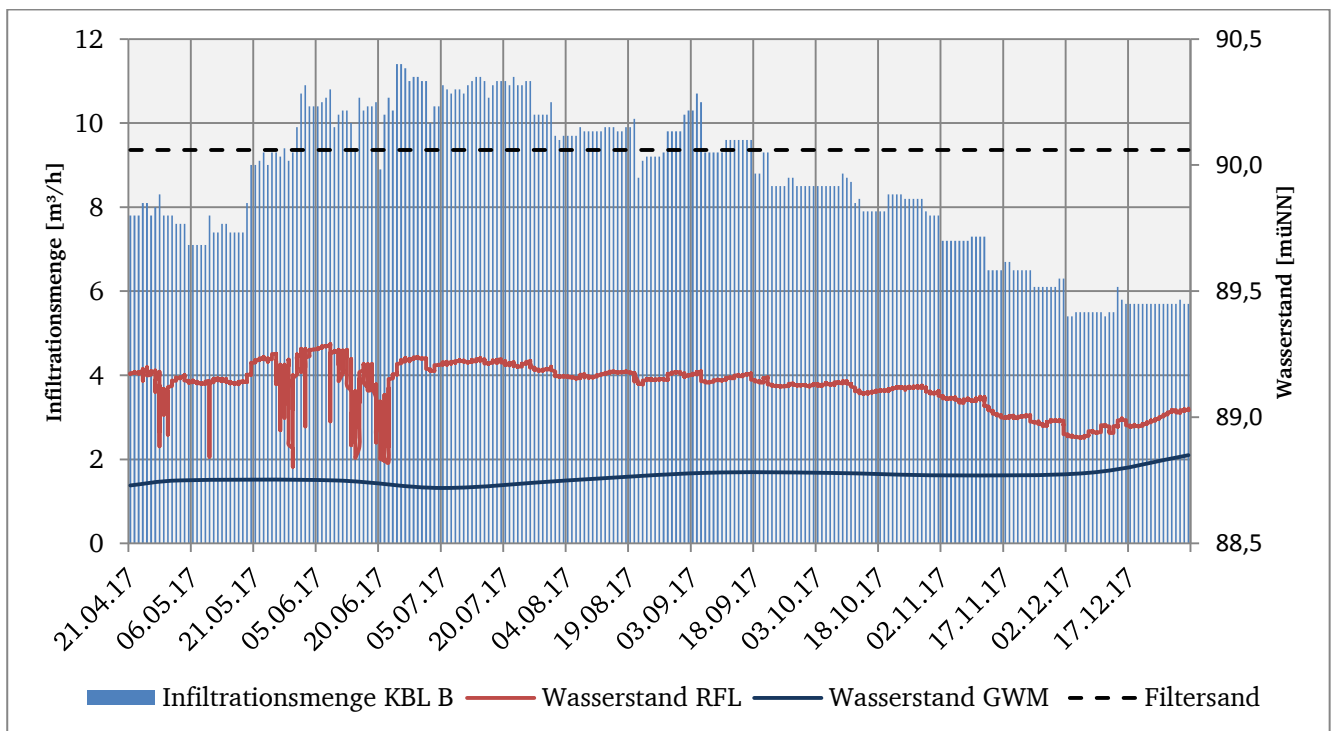


Abbildung F-6: Infiltrationsmenge und Wasserstand der mittleren Rammfilterlanze im Kiesbohrloch B sowie Wasserstandsganglinie der Landesmessstelle 544018 in 2017

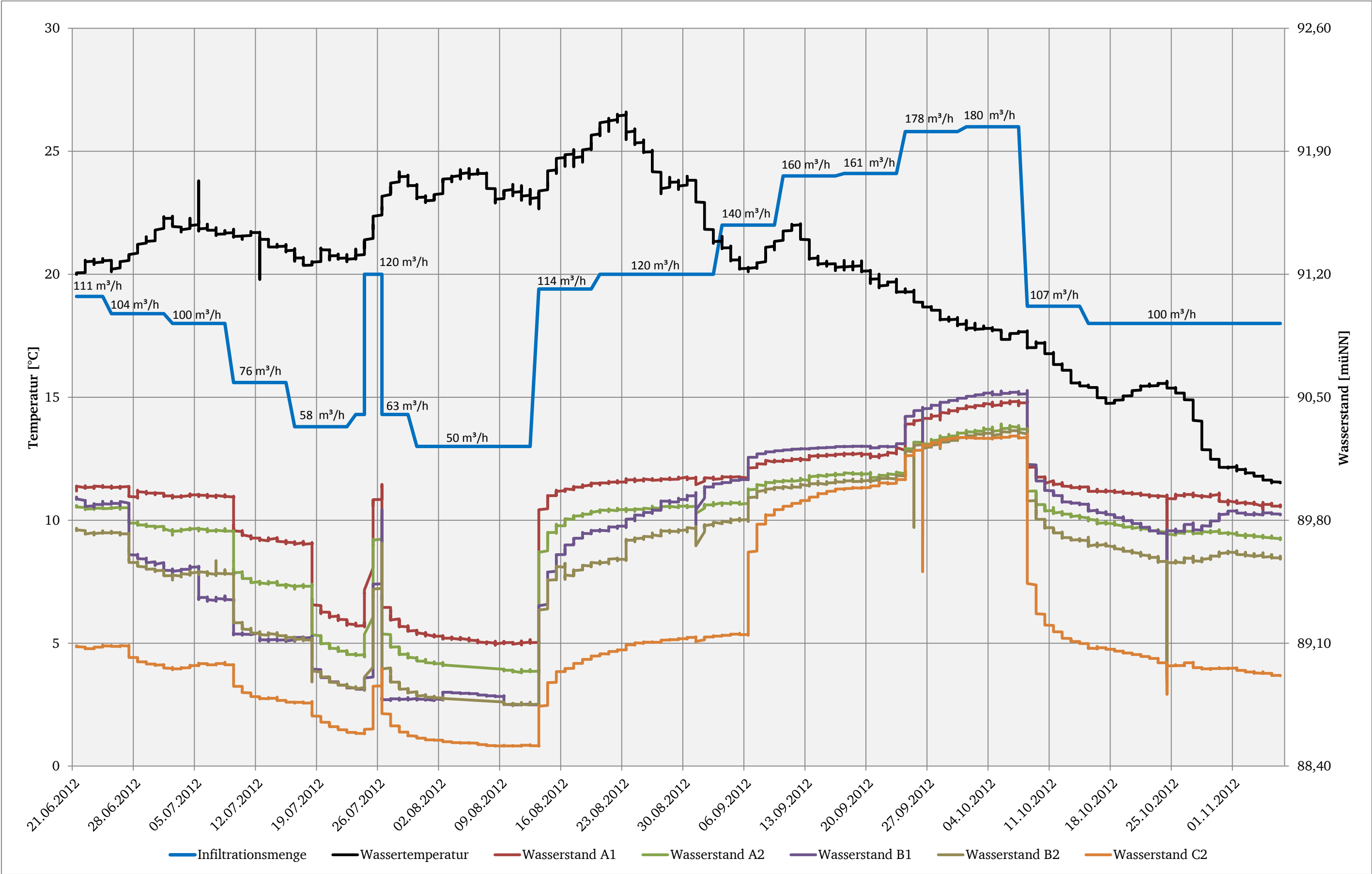


Abbildung F-7: Darstellung der Daten des Infiltrationsversuchs am Sickerschlitzengraben im Gernsheimer Wald

## Anlage G: Abbildungen und Tabellen der Parametervariation

### G.1: Modell Kiesbohrlöcher

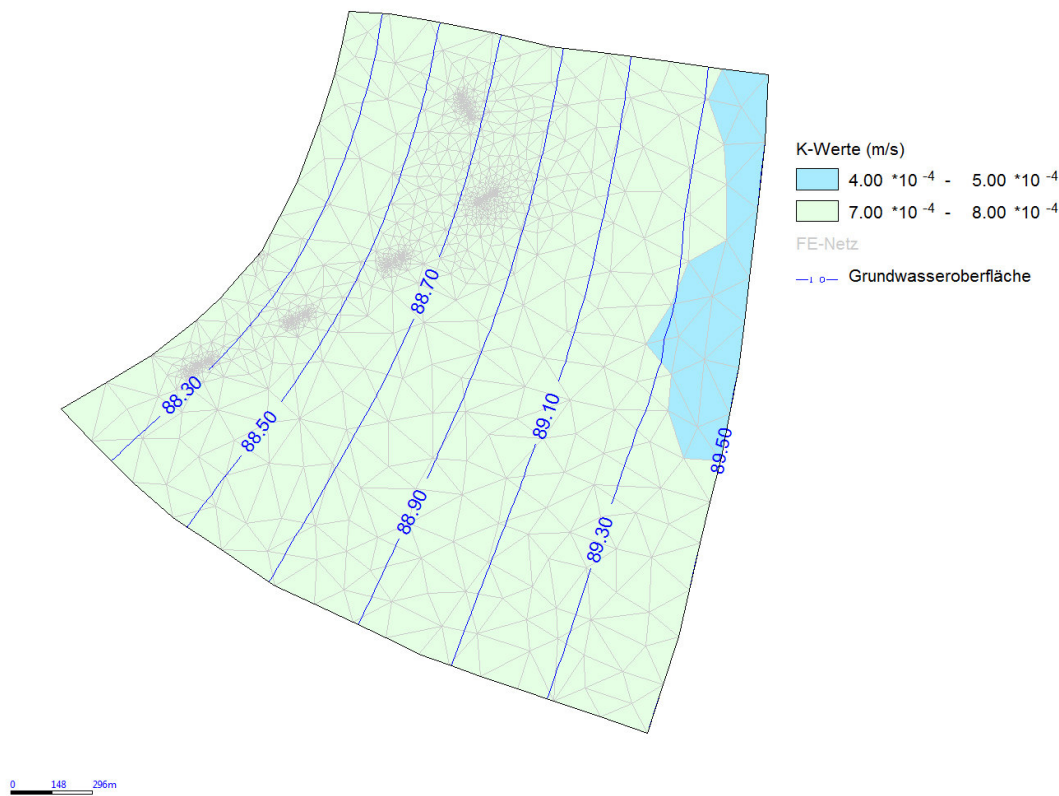


Abbildung G-1: Grundwassergleichung im Modellgebiet Jägersburger Wald ohne Infiltrationsmengen

Tabelle G-1: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Übertau Grundzustand 1		res. Überstau $k_f$ -Wert Filtersand: $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$		res. Überstau $k_f$ -Wert Filtersand: $1,45 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,34	90,37	0,24	90,27	0,53	90,56
B	0,39	90,45	0,29	90,35	0,59	90,65
C	0,76	90,40	0,67	90,31	0,96	90,60
D	0,80	90,44	0,70	90,34	0,99	90,63
E	0,73	90,37	0,63	90,27	0,93	90,57

Tabelle G-2: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Übertau Grundzustand 2		res. Überstau $k_f$ -Wert Filtersand: $5,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$		res. Überstau $k_f$ -Wert Filtersand: $1,45 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,61	90,64	1,35	91,38	0,18	90,21
B	0,60	90,66	1,33	91,39	0,18	90,24
C	0,64	90,28	1,32	90,96	0,24	89,88
D	0,64	90,28	1,31	90,95	0,23	89,87
E	0,64	90,28	1,32	90,96	0,23	89,87

Tabelle G-3: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 1	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filtersand: $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filtersand: $1,45 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,88	89,89	89,88
B	89,96	89,97	89,96
C	89,92	89,93	89,92
D	89,96	89,97	89,96
E	89,90	89,90	89,89

Tabelle G-4: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf den Überstau auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 2	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filtersand: $5,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filtersand: $1,45 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,00	89,00	89,00
B	89,04	89,04	89,04
C	89,02	89,02	89,02
D	89,04	89,04	89,04
E	89,02	89,02	89,02

Tabelle G-5: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Übertau Grundzustand 1		res. Überstau $k_f$ -Wert Filterkies: $9,2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$		res. Überstau $k_f$ -Wert Filterkies: $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,34	90,37	0,22	90,25	0,54	90,57
B	0,39	90,45	0,28	90,34	0,59	90,65
C	0,76	90,40	0,65	90,29	0,96	90,60
D	0,80	90,44	0,69	90,33	0,99	90,63
E	0,73	90,37	0,62	90,26	1,01	90,65

Tabelle G-6: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Übertau Grundzustand 2		res. Überstau $k_f$ -Wert Filterkies: $9,2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$		res. Überstau $k_f$ -Wert Filterkies: $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,61	90,64	0,81	90,84	0,62	90,65
B	0,60	90,66	0,80	90,86	0,60	90,66
C	0,64	90,28	0,70	90,34	0,60	90,24
D	0,64	90,28	0,69	90,33	0,62	90,26
E	0,64	90,28	0,70	90,34	0,60	90,24



Tabelle G-7: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 1	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filterkies: $9,2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filterkies: $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,88	89,91	89,84
B	89,96	89,99	89,92
C	89,92	89,95	89,88
D	89,96	89,99	89,92
E	89,90	89,90	89,68

Tabelle G-8: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterkiesschicht auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 2	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filterkies: $9,2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$	res. Wasserstand $k_f$ -Wert Filterkies: $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,00	89,01	88,98
B	89,04	89,05	89,02
C	89,02	89,03	89,00
D	89,04	89,05	89,02
E	89,02	89,02	89,00

Tabelle G-9: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Übertau Grundzustand 1		res. Überstau $k_f$ -Wert Aquifer: $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$		res. Überstau $k_f$ -Wert Aquifer: $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,34	90,37	0,04	90,07	1,70	91,73
B	0,39	90,45	0,04	90,10	1,82	91,88
C	0,76	90,40	0,02	89,66	2,16	91,80
D	0,80	90,44	0,01	89,65	2,19	91,83
E	0,73	90,37	0,02	89,66	2,08	91,72

Tabelle G-10: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Übertau Grundzustand 2		res. Überstau $k_f$ -Wert Aquifer: $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$		res. Überstau $k_f$ -Wert Aquifer: $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,61	90,64	0,59	90,62	0,67	90,70
B	0,60	90,66	0,56	90,62	0,68	90,74
C	0,64	90,28	0,63	90,27	0,68	90,32
D	0,64	90,28	0,62	90,26	0,72	90,36
E	0,64	90,28	0,63	90,27	0,69	90,33

Tabelle G-11: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 1	res. Wasserstand k <sub>f</sub> -Wert Aquifer: $1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s	res. Wasserstand k <sub>f</sub> -Wert Aquifer: $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,88	89,09	91,24
B	89,97	89,14	91,40
C	89,93	89,11	91,33
D	89,96	89,10	91,39
E	89,90	89,14	91,25

Tabelle G-12: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 2	res. Wasserstand k <sub>f</sub> -Wert Aquifer: $1,4 \cdot 10^{-3}$ m/s	res. Wasserstand k <sub>f</sub> -Wert Aquifer: $3,5 \cdot 10^{-4}$ m/s
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,00	88,60	89,40
B	89,04	88,63	89,44
C	89,02	88,62	89,41
D	89,04	88,63	89,45
E	89,02	88,62	89,42

Tabelle G-13: Einfluss des Grundwasserstands auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Überstau Grundzustand 1		res. Überstau Grundwasserstand: +1 m		res. Überstau Grundwasserstand: -1 m	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,34	90,37	1,26	91,29	0,03	90,06
B	0,39	90,45	1,31	91,37	0,03	90,09
C	0,76	90,40	1,70	91,34	0,02	89,66
D	0,80	90,44	1,73	91,37	0,02	89,66
E	0,73	90,37	1,67	91,31	0,02	89,66

Tabelle G-14: Einfluss des Grundwasserstands auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Überstau Grundzustand 2		res. Überstau Grundwasserstand: +1 m		res. Überstau Grundwasserstand: -1 m	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,61	90,64	0,83	90,86	0,82	90,85
B	0,60	90,66	0,84	90,90	0,41	90,47
C	0,64	90,28	1,24	90,88	0,50	90,14
D	0,64	90,28	1,27	90,91	0,64	90,28
E	0,64	90,28	1,24	90,88	0,58	90,22

Tabelle G-15: Einfluss des Grundwasserstands auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 1	res. Wasserstand Grundwasserstand: + 1 m	res. Wasserstand Grundwasserstand: -1 m
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,88	90,82	89,00
B	89,97	90,90	89,08
C	89,93	90,87	89,02
D	89,96	90,84	89,06
E	89,90	90,90	88,99

Tabelle G-16: Einfluss des Grundwasserstands auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 2	res. Wasserstand Grundwasserstand: + 1 m	res. Wasserstand Grundwasserstand: -1 m
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,00	89,95	88,06
B	89,04	89,99	88,10
C	89,02	89,98	88,07
D	89,04	90,00	88,10
E	89,02	89,98	88,07

Tabelle G-17: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Überstau bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Überstau Grundzustand 1		res. Überstau Infiltrationsmenge: 30 m³/h		res. Überstau Infiltrationsmenge: 20 m³/h	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,34	90,37	0,71	90,74	0,00	90,03
B	0,39	90,45	0,78	90,84	-0,01	90,05
C	0,76	90,40	1,15	90,79	0,37	90,01
D	0,80	90,44	1,19	90,83	0,41	90,05
E	0,73	90,37	1,11	90,75	0,35	89,99

Tabelle G-18: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Überstau bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Überstau Grundzustand 2		res. Überstau Infiltrationsmenge: 15 m³/h		res. Überstau Infiltrationsmenge: 5 m³/h	
	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]	[m]	[müNN]
A	0,61	90,64	1,00	91,03	0,42	90,45
B	0,60	90,66	1,02	91,08	0,42	90,48
C	0,64	90,28	1,04	90,68	0,29	89,93
D	0,64	90,28	1,07	90,71	0,28	89,92
E	0,64	90,28	1,03	90,67	0,29	89,93

Tabelle G-19: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei gekoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 1	res. Wasserstand Infiltrationsmenge: 30 m³/h	res. Wasserstand Infiltrationsmenge: 30 m³/h
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,88	90,17	89,60
B	89,97	90,27	89,67
C	89,93	90,22	89,63
D	89,96	90,26	89,66
E	89,90	90,18	89,61

Tabelle G-20: Einfluss der Infiltrationsmenge auf den Wasserstand auf Höhe der mittleren Rammfilterlanze bei entkoppelten Strömungsverhältnissen

Kiesbohrloch	res. Wasserstand Grundzustand 2	res. Wasserstand Infiltrationsmenge: 15 m³/h	res. Wasserstand Infiltrationsmenge: 5 m³/h
	[müNN]	[müNN]	[müNN]
A	89,00	89,30	88,69
B	89,04	89,35	88,71
C	89,02	89,32	88,71
D	89,04	89,35	88,72
E	89,02	89,31	88,71

## G.2: Modell Sickerschlitzgraben

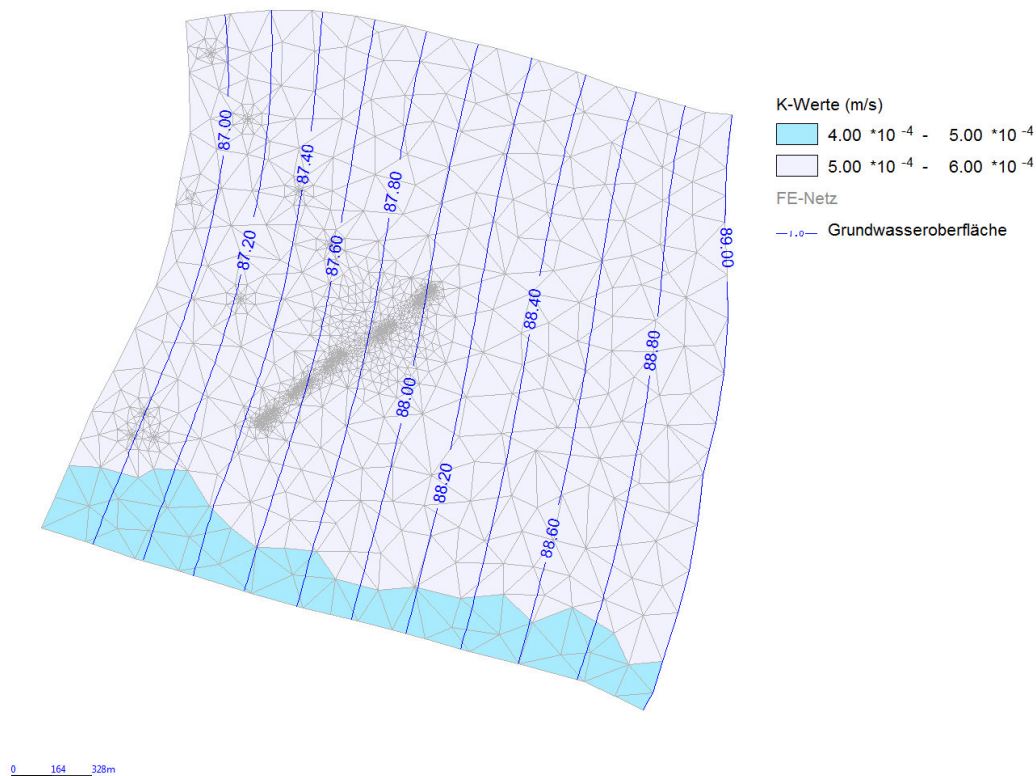


Abbildung G-2: Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald ohne Infiltrationsmengen

Tabelle G-21: Grundwassergleichen im Modellgebiet Gernsheimer Wald ohne Infiltrations- und Fördermengen

Parameter	Startwert	Simulationswert	$\Delta$ WS A1	$\Delta$ WS A2	$\Delta$ WS B1	$\Delta$ WS B2	$\Delta$ WS C2
	[-]	[-]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
$k_f$ -Wert Filterkies 1	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$9,2 \cdot 10^{-2}$ m/s	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03
	$4,6 \cdot 10^{-2}$ m/s	$2,3 \cdot 10^{-2}$ m/s	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02
$k_f$ -Wert Filtersand	$2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s	$5,8 \cdot 10^{-3}$ m/s	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
	$2,9 \cdot 10^{-3}$ m/s	$1,45 \cdot 10^{-3}$ m/s	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02
$k_f$ -Wert Filterkies 2	$2,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	$3,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	0,00	0,00	-0,02	-0,01	0,04
	$2,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	$1,0 \cdot 10^{-2}$ m/s	0,01	-0,01	0,02	0,01	0,03
$k_f$ -Wert Aquifer	$5,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	$6,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	-0,17	-0,18	0,58	0,57	-0,27
	$5,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	$4,25 \cdot 10^{-4}$ m/s	0,43	0,43	0,69	0,68	0,65
Grundwasserstand	89 müNN	89,5 müNN	-0,32	-0,32	-0,34	0,66	-0,58
	89 müNN	88,5 müNN	-0,02	-0,02	0,14	0,16	-0,82
Infiltrationsmenge	100 m <sup>3</sup> /h	112,5 m <sup>3</sup> /h	0,25	0,25	0,25	0,25	0,36
	100 m <sup>3</sup> /h	87,5 m <sup>3</sup> /h	-0,03	-0,04	-0,41	-0,40	-0,34



Tabelle G-22: Einfluss der Durchlässigkeit der oberen Filterkiesschicht auf die Infiltrationsparameter

k <sub>f</sub> -Wert Filterkies 1	Länge Einstau	max. Einstauhöhe	A1	A2	B1	B2	C2
[m/s]	[m]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
9,2·10 <sup>-2</sup>	46,8	0,33	90,76	90,73	90,65	90,63	90,02
4,6·10 <sup>-2</sup>	46,5	0,35	90,77	90,75	90,67	90,65	90,05
2,3·10 <sup>-2</sup>	47,8	0,36	90,78	90,76	90,67	90,65	90,07

Tabelle G-23: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf die Infiltrationsparameter

k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	Länge Einstau	max. Einstauhöhe	A1	A2	B1	B2	C2
[m/s]	[m]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
5,8·10 <sup>-3</sup>	45,8	0,35	90,8	90,78	90,69	90,67	90,08
2,9·10 <sup>-3</sup>	45,4	0,35	90,77	90,75	90,67	90,65	90,05
1,45·10 <sup>-3</sup>	48,6	0,35	90,74	90,72	90,64	90,62	90,03

Tabelle G-24: Einfluss der Durchlässigkeit der unteren Filterkiesschicht auf die Infiltrationsparameter

k <sub>f</sub> -Wert Filterkies 2	Länge Einstau	max. Einstauhöhe	A1	A2	B1	B2	C2
[m/s]	[m]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
3,0·10 <sup>-2</sup>	45,0	0,32	90,77	90,75	90,65	90,64	90,09
2,0·10 <sup>-2</sup>	45,4	0,35	90,77	90,75	90,67	90,65	90,05
1,0·10 <sup>-2</sup>	50,6	0,42	90,78	90,74	90,69	90,66	90,08

Tabelle G-25: Einfluss der Durchlässigkeit des Aquifers auf die Infiltrationsparameter

k <sub>f</sub> -Wert Aquifer	Länge Einstau	max. Einstauhöhe	A1	A2	B1	B2	C2
[m/s]	[m]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
7,25·10 <sup>-4</sup>	kein Einstau	kein Einstau	90,02	89,99	89,24	89,23	88,92
6,25·10 <sup>-4</sup>	14,4	0,07	90,32	90,29	90,52	90,51	89,17
5,25·10 <sup>-4</sup>	24,5	0,07	90,49	90,47	89,94	89,94	89,44
4,25·10 <sup>-4</sup>	43,6	0,48	90,92	90,9	90,63	90,62	90,09
3,25·10 <sup>-4</sup>	übergelaufen	übergelaufen	90,56	90,54	91,32	91,31	91,05

Tabelle G-26: Einfluss des Grundwasserstands auf die Infiltrationsparameter

GW Stand	Länge Einstau	max. Einstauhöhe	A1	A2	B1	B2	C2
[müNN]	[m]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
90	übergelaufen	übergelaufen	91,47	91,45	91,39	91,37	91,09
89,5	75	0,65	91,09	91,07	91,01	89,99	90,63
89	45,4	0,35	90,77	90,75	90,67	90,65	90,05
88,5	23,8	0,61	90,75	90,73	90,81	90,81	89,23
88	15,6	0,38	90,41	90,38	89,31	89,3	88,79

Tabelle G-27: Einfluss der Infiltrationsmenge auf die Infiltrationsparameter

Infiltrations- menge	Länge Einstau	max. Einstauhöhe	A1	A2	B1	B2	C2
[m³/s]	[m]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
125 m³/h	übergelaufen	übergelaufen	91,23	91,21	91,15	91,13	91,75
112.5 m³/h	58,4	0,59	91,02	91	90,92	90,9	90,41
100 m³/h	45,4	0,35	90,77	90,75	90,67	90,65	90,05
87.5 m³/h	29,3	0,33	90,74	90,71	90,26	90,25	89,71
75 m³/h	kein Einstau	kein Einstau	90,26	90,24	89,99	89,98	89,48

## Anlage H: Tabellen der Analyse einflussnehmender Parameter

### H.1: Modell Kiesbohrlöcher

Tabelle H-1: Einfluss der Durchlässigkeit der Filterschichten auf die Infiltrationsmenge

Kiesbohrloch	$k_f$ -Wert Filtersand	$k_f$ -Wert Filterkies	Überstau	Infiltrations- menge
-	[m/s]	[m/s]	[m]	[m³/h]
A	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,2
B	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,4
C	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,2
D	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,5
E	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,9
A	-	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	20,8
B	-	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	19,5
C	-	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	15,2
D	-	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	15,0
E	-	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	16,9
A	-	$1,2 \cdot 10^{-1}$	1	22,0
B	-	$1,2 \cdot 10^{-1}$	1	20,4
C	-	$1,2 \cdot 10^{-1}$	1	15,8
D	-	$1,2 \cdot 10^{-1}$	1	15,6
E	-	$1,2 \cdot 10^{-1}$	1	17,7

Tabelle H-2: Einfluss der Durchlässigkeit der Filtersandschicht auf die Infiltrationsmenge

Kiesbohrloch	kf-Wert Filtersand	kf-Wert Filterkies	Überstau	Infiltrationsmenge	gekoppelte Verhältnisse
-	[m/s]	[m/s]	[m]	[m³/h]	-
A	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	1,8	nein
B	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	3,0	nein
C	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,6	nein
D	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	5,3	nein
E	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,2	nein
A	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	1,8	nein
B	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	3,0	nein
C	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,7	nein
D	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,1	nein
E	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,2	nein
A	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	1,8	nein
B	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	3,0	nein
C	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,3	ja
D	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,1	ja
E	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,2	nein
A	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	4,3	nein
B	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	5,1	nein
C	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,3	ja
D	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,2	ja
E	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,4	ja
A	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,2	nein
B	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,0	nein
C	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,4	ja
D	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,5	ja
E	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,1	ja
A	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,2	nein
B	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,8	ja
C	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,2	ja
D	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,5	ja
E	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,6	ja
A	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,6	ja
B	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,9	ja
C	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,3	ja
D	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,8	ja
E	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,1	ja
A	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,5	ja
B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,5	ja
C	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,4	ja
D	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,8	ja
E	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,5	ja
A	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,2	ja
B	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,1	ja
C	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,5	ja
D	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,0	ja
E	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,8	ja
A	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,8	ja
B	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,6	ja
C	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,5	ja
D	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,1	ja
E	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,1	ja
A	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,3	ja
B	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,0	ja
C	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,6	ja
D	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,2	ja
E	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,3	ja

Tabelle H-3: Resultierende Frachten bei unterschiedlichen Infiltrationsmengen und Eisen- sowie Mangangehalten

Infiltrations- menge	Eisen- konzentration	Eisenfracht	Mangan- konzentration	Manganfracht
[m³/h]	[mg/l]	[kg/a]	[mg/l]	[kg/a]
5	0,200	8.760	0,050	2.190
5	0,020	876	0,005	219
5	0,002	88	0,0005	22
15	0,200	26.280	0,050	6.570
15	0,020	2.628	0,005	657
15	0,002	263	0,0005	66
25	0,200	43.800	0,050	10.950
25	0,020	4.380	0,005	1.095
25	0,002	438	0,0005	110

Tabelle H-4: Einfluss der Temperatur des Infiltrationswassers auf die Infiltrationsmenge

Temperatur	Kiesbohrloch	k <sub>f</sub> -Wert Filtersand	k <sub>f</sub> -Wert Filterkies	Überstau	Infiltrations- menge
[°C]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m³/h]
6	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,4
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,3
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	5,4
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	5,3
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	5,5
11	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,2
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,1
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,0
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,0
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,2
16	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,1
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,9
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,7
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,7
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,9
21	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,1
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,9
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,5
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,4
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,7
26	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,1
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,9
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,3
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,2
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,6



Tabelle H-5: Einfluss des Grundwasserstands auf die Infiltrationsmenge

$\Delta$ GW-Stand	Kiesbohrloch	$k_f$ -Wert Filtersand	$k_f$ -Wert Filterkies	Überstau	Infiltrations- menge
[m]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m³/h]
-1	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14,4
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14,6
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14,5
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14,2
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14,8
-0,8	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	15,2
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	15,5
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,5
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,3
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,94
-0,6	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	15,2
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14,7
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,7
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,5
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,2
-0,4	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14,4
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	14
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,9
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,7
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,3
-0,2	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,6
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	13,3
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,1
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,9
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,5
0	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,8
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,5
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,3
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,1
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,7
0,2	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,7
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,4
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,3
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,8
0,4	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	11,2
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,9
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,6
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,5
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9
0,6	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,4
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,1
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,7
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,7
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,1
0,8	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,5
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	9,3
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,9
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,8
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	7,3
1	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,6
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	8,5
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	6,3

Tabelle H-6: Einfluss der Überstauhöhe auf die Infiltrationsmenge

$\Delta$ Überstau	Kiesbohrloch	$k_f$ -Wert Filtersand	$k_f$ -Wert Filterkies	Überstau	Infiltrations- menge
[m]	[-]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m³/h]
-0,5	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,5	8,8
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,5	8,7
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,5	8,2
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,5	8
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,5	8,4
-0,4	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,6	9,5
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,6	9,5
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,6	8,7
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,6	8,5
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,6	8,9
-0,3	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,7	11,1
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,7	11
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,7	8,9
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,7	8,8
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,7	9,3
-0,2	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,8	11,9
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,8	11,6
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,8	9,4
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,8	9,3
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,8	9,7
-0,1	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,9	12,4
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,9	12,0
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,9	9,8
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,9	9,7
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	0,9	10,2
0	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,8
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	12,5
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,3
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,1
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1	10,7
0,1	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,1	13,3
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,1	13
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,1	10,7
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,1	10,6
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,1	11,1
0,2	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,2	13,8
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,2	13,4
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,2	11,2
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,2	11
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,2	11,6
0,3	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,3	14,3
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,3	13,8
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,3	11,6
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,3	11,5
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,3	12,1
0,4	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,4	14,8
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,4	14,3
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,4	12,1
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,4	11,9
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,4	12,6
0,5	A	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,5	15,2
	B	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,5	14,8
	C	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,5	12,5
	D	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,5	12,4
	E	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	1,5	13

Tabelle H-7: Einfluss der Infiltration anderer Organe auf die Infiltrationsmenge

Kiesbohrloch	Infiltrationsmenge der anderen Organe	res. Infiltrationsmenge Organ 6
[-]	[m³/h]	[m³/h]
A	0	12,80
	5	12,40
	10	12,00
	15	11,50
	20	11,00
	25	10,60
B	0	12,50
	5	12,10
	10	11,60
	15	11,20
	20	10,80
	25	10,40
C	0	10,30
	5	9,80
	10	9,40
	15	8,90
	20	8,40
	25	8,00
D	0	10,10
	5	9,70
	10	9,30
	15	8,80
	20	8,40
	25	8,00
E	0	10,70
	5	10,20
	10	9,80
	15	9,30
	20	8,80
	25	8,40

Tabelle H-8: Einfluss der Infiltration der anderen Kiesbohrlöcher auf die Infiltrationsmenge des betrachteten Kiesbohrlochs am Organ 6

Betrachtetes Kiesbohrloch	Infiltrationsmenge der anderen KBL	res. Infiltrationsmenge des betrachteten KBL
[-]	[m³/h]	[m³/h]
A	0	14,10
	5	14,80
	10	13,30
	15	11,80
	20	10,20
	25	8,60
B	0	14,10
	5	14,70
	10	13,10
	15	11,30
	20	9,50
	25	7,70
C	0	14,20
	5	12,60
	10	10,90
	15	9,10
	20	7,30
	25	5,50
D	0	14,20
	5	12,50
	10	10,70
	15	8,80
	20	7,00
	25	5,10
E	0	14,20
	5	12,60
	10	11,00
	15	9,40
	20	7,80
	25	6,10

## H.2: Modell Sickerschlitzengraben

Tabelle H-9: Einfluss des Grundwasserstands auf die Infiltrationsparameter

$\Delta$ GW- Stand	res. Infiltrationsmenge	Länge Wasserüberstau	A1	A2	B1	B2	C1	C2
[m]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
-0,5	115,14	26,9	89,98	89,89	89,03	89,02	88,49	88,49
-0,4	112,35	27,4	90,03	89,91	89,05	89,05	88,55	88,55
-0,3	109,73	27,7	90,04	89,95	89,10	89,10	88,62	88,62
-0,2	107,12	27,9	90,06	89,99	89,15	89,15	88,69	88,69
-0,1	104,15	28,9	90,09	90,01	89,19	89,19	88,76	88,76
0	101,48	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
0,1	98,86	29,4	90,15	90,07	89,31	89,31	88,91	88,91
0,2	96,21	30,1	90,18	90,11	89,37	89,37	88,98	88,98
0,3	93,27	31,8	90,20	90,14	89,43	89,43	89,05	89,05
0,4	90,55	32,1	90,23	90,17	90,49	90,49	89,13	89,13
0,5	87,87	32,2	90,26	90,20	89,55	89,55	89,20	89,20

Tabelle H-10: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts der Filtersandschicht auf die Infiltrationsmenge

$k_f$ -Wert Filtersand	res. Infiltrationsmenge	Länge Wasserüberstau	A1	A2	B1	B2	C1	C2
[m/s]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
$2,0 \cdot 10^{-4}$	73,17	34,4	89,54	89,49	88,97	88,97	88,61	88,61
$3,0 \cdot 10^{-4}$	87,39	32,1	89,85	89,78	89,11	89,11	88,72	88,72
$4,0 \cdot 10^{-4}$	96,90	31,3	90,03	89,96	89,20	89,20	88,80	88,80
$5,0 \cdot 10^{-4}$	101,48	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$6,0 \cdot 10^{-4}$	104,73	28,4	90,18	90,1	89,29	89,29	88,86	88,86
$7,0 \cdot 10^{-4}$	107,09	27,6	90,22	90,15	89,31	89,31	88,88	88,88
$8,0 \cdot 10^{-4}$	108,89	27,1	90,26	90,18	88,33	88,33	88,89	88,89

Entkoppelte Strömungsverhältnisse ab einem  $k_f$ -Wert von  $\leq 3,0$  m/s

Tabelle H-11: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Filterkieses 1 auf die Infiltrationsparameter

$k_f$ -Wert Filterkies 1	res. Infiltrations- menge	Länge Wasserüberstau	A1	A2	B1	B2	C1	C2
[m/s]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
$3,1 \cdot 10^{-2}$	101,29	29,7	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$3,6 \cdot 10^{-2}$	101,36	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$4,1 \cdot 10^{-2}$	101,42	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$4,6 \cdot 10^{-2}$	101,48	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$5,1 \cdot 10^{-2}$	101,54	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$5,6 \cdot 10^{-2}$	101,59	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$6,1 \cdot 10^{-2}$	101,64	29,5	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83



Tabelle H-12: Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwerts des Filterkieses 2 auf die Infiltrationsparameter

kf-Wert Filterkies 2	res. Infiltrations- menge	Länge Wasserüberstau	A1	A2	B1	B2	C1	C2
[m/s]	[m³/h]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
$6,5 \cdot 10^{-3}$	99,52	28,8	90,08	89,99	89,23	89,23	88,81	88,81
$7,0 \cdot 10^{-3}$	100,23	29,1	90,09	90,03	89,24	89,24	88,82	88,82
$7,5 \cdot 10^{-3}$	100,88	29,3	90,1	90,03	89,25	89,25	88,83	88,83
$8,0 \cdot 10^{-3}$	101,48	29,6	90,12	90,04	89,25	89,25	88,83	88,83
$8,5 \cdot 10^{-3}$	102,04	29,9	90,13	90,06	89,26	89,25	88,84	88,84
$9,0 \cdot 10^{-3}$	102,55	30,1	90,14	90,07	89,26	89,26	88,85	88,85
$9,5 \cdot 10^{-3}$	103,03	30,4	90,15	90,08	89,27	89,27	88,85	88,85

Tabelle H-13: Einfluss der Infiltrationsmenge der anderen Organe auf die Infiltrationsparameter

Infiltrations- menge	res. Infiltrations- menge	Länge Wasserüberstau	A1	A2	B1	B2	C1	C2
[m³/h]	[m³/h]	[m]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]	[müNN]
0	107,61	27,8	90,06	89,98	89,14	89,14	88,86	88,86
5	96,64	29,8	90,17	90,11	89,36	89,36	88,97	88,97
10	85,67	32,3	90,29	90,23	89,61	89,61	89,27	89,27
15	74,14	32,7	90,39	90,35	89,85	89,85	89,56	89,56
20	59,51	32,7	90,49	90,45	90,04	90,04	89,83	89,83
25	48,47	32,8	90,60	90,57	90,28	90,28	90,11	90,11

---

## Eidesstattliche Erklärung

Abschlussarbeit von:

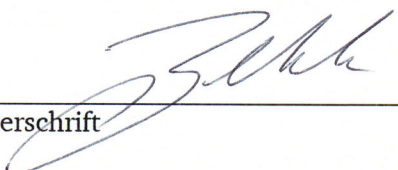
Vera Rebecca Behle

### Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Vera Rebecca Behle, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfbehörde vorgelegen.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung überein.

Darmstadt, den 5.11.2018

  
Unterschrift

